

Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisu • Energia • 2019:20

KYT2018

Kansallinen

ydinjätehuollon

tutkimusohjelma

2015–2018

Loppuraportti



Työ- ja elinkeinoministeriö
Arbets- och näringsministeriet

Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja 2019:20

KYT2018
Kansallinen ydinjätehuollon
tutkimusohjelma 2015–2018

Loppuraportti

Työ- ja elinkeinoministeriö

ISBN PDF: 978-952-327-408-2

Taitto: Taina Ståhl

Helsinki 2019

Kuvailulehti

Julkaisija	Työ- ja elinkeinoministeriö		5.4.2019
Tekijät	KYT2018 Johtoryhmä puheenjohtaja Jarkko Kyllönen, sihteeri Kari Rasilainen		
Julkaisun nimi	KYT2018 Kansallinen ydinjätehuollon tutkimusohjelma 2015–2018 Loppuraportti		
Julkaisusarjan nimi ja numero	Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja 2019:20		
Diaari/ hankenumero		Teema	Energia
ISBN PDF	978-952-327-408-2	ISSN PDF	1797-3562
URN-osoite	http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-327-408-2		
Sivumäärä	165	Kieli	suomi
Asiasanat	ydinenergia, ydinturvallisuus, ydinjäte, tutkimus		
Tiivistelmä KYT2018 oli työ- ja elinkeinoministeriön tutkimusohjelma, jossa tavoitteena on ollut varmistaa, että viranomaisilla on saatavilla riittävästi ja kattavasti sellaista ydinteknistä asiantuntemusta ja muita valmiuksia, jota tarvitaan ydinjätehuollon erilaisten toteutustapojen ja menetelmien vertailuun. Ydinjätehuollon valvontavelvollisuuteen ja lupahakemuksiin suoraan liittyvä tutkimus kuuluu viranomaisten ja jätehuoltovelvollisten muihin ohjelmiin. KYT2018-tutkimusohjelma toteutettiin vuosina 2015–2018. Julkisten ydinturvallisuustutkimusohjelmien lähtökohtana on, että ne luovat edellytyksiä ydinvoiman turvallisen ja taloudellisen käytön jatkumiseen tarvittavan tietämyksen säilymiselle, uuden tietämyksen kehittämiselle ja kansainväliseen yhteistyöhön osallistumiselle. Alan tutkimusta Suomessa harjoittavat organisaatiot ovat olleet tärkeä voimavara, jota eri ministeriöt, Säteilyturvakeskus (STUK), voimayhtiöt ja Posiva ovat pystyneet hyödyntämään. KYT2018 tutkimusohjelman sisältö koostui kansallisesti tärkeistä tutkimuskohteista, jotka ovat ydinjätehuollon pikäaikaisturvallisuus, ydinjätehuollon teknologiat ja ydinjätehuolto ja yhteiskunta. Tutkimusohjelmassa oli mukana 32 tutkimus- tai infrahanketta. KYT2018 tutkimusohjelma toimi myös viranomaisten, ydinjätehuoltoa toteuttavien organisaatioiden ja tutkimuslaitosten välisenä keskustelu- ja tiedonvälitysfoorumina, jossa luodaan edellytyksiä rajallisten tutkimusresurssien hyödyntämiselle. Ohjelmassa pyrittiin osaltaan edistämään kansallisen osaamisen ja tutkimus-infrastruktuurin kehitystä, varmistamaan asiantuntemuksen jatkuva saatavuus, edistämään korkealaatuista tieteellistä tutkimusta ja lisäämään yleistä tietämystä ydinjätehuollon alalla. Tutkimusohjelman kansainvälisen arvion mukaan pyrkimyksissä onnistuttiin. Loppuraportti on laadittu tutkimusohjelman johtoryhmän puolesta. TEM:n yhdyshenkilö: Energiaosasto/Linda Kumpula, puh. +358 29 506 0125.			
Kustantaja	Työ- ja elinkeinoministeriö		
Julkaisun jakaja/myynti	Sähköinen versio: julkaisut.valtioneuvosto.fi Julkaisumyynti: julkaisutitlaukset.valtioneuvosto.fi		

Presentationsblad

Utgivare	Arbets- och näringsministeriet		5.4.2019
Författare	Ledargruppen för KYT2018 ordförande Jarkko Kyllönen, sekreterare Kari Rasilainen		
Publikationens titel	KYT2018 Nationellt forskningsprogram för kärnavfallshantering 2015–2018 Slutrapport		
Publikationsseriens namn och nummer	Arbets- och näringsministeriets publikationer 2019:20		
Diarie-/ projektnummer		Tema	Energi
ISBN PDF	978-952-327-408-2	ISSN PDF	1797-3562
URN-adress	http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-327-408-2		
Sidantal	165	Språk	finska
Nyckelord	kärnenergi, kärnsäkerhet, kärnavfall, forskning		
Referat KYT2018 var arbets- och näringsministeriets forskningsprogram, vars mål har varit att säkra, att det till myndigheters förfogande finns tillräcklig och omfattande tillgång till sådan kärnteknisk sakkunskap, som behövs för att jämföra olika tillvägagångssätt och metoder för kärnavfalls- hantering. Den forskning, som direkt hör till övervakningsplikten av kärnavfallshantering och till tillståndsansökningar, hör till myndigheternas och de avfallshanteringsskyldigas övriga program. Forskningsprogrammet KYT2018 sträckte sig över åren 2015–2018. Utgångspunkten för programmen inom kärnsäkerhetsforskning är att de skapar förut- sättningar för upprätthållande och utveckling av sådant kunnande, samt deltagande i interna- tionellt samarbete, som en fortsatt säker och ekonomisk användning av kärnkraft förutsätter. De organisationer, som bedriver forskning inom detta fackområde har varit en stark tillgång, som olika ministerier, Strålsäkerhetscentralen (STUK), kärnkraftsbolagen och Posiva har kunnat utnyttja. Innehållet i forskningsprogrammet KYT2018 bestod av nationellt viktiga forskningsmål, det vill säga långtidssäkerhet för kärnavfallshantering, teknik inom kärnavfallshantering och kärn- avfallshantering och samhället. Inom forskningsprogrammet fanns 32 forsknings- och infraprojekt. KYT2018 forskningsprogrammet fungerade också som ett diskussions- och informationsforum för myndigheter, de organisationer som verkställer kärnavfallshantering och forskningsinstitutionerna, varvid man skapar förutsättningar för användning av de begränsade forskningsresurserna. Strävan är att inom programmet för sin del befrämja utveckling av det nationella kunnandet, av infrastrukturen, säkra fortlöpande tillgång till sakkunskap, befrämja högklassig vetenskaplig forskning samt öka kunskapen inom kärnavfallshanteringens fackområde. Enligt den internationella utvärderingen av forskningsprogrammet lyckades man med detta. Slutrapporten har utarbetats på uppdrag av forskningsprogrammets ledargrupp. Kontaktperson på ANM: Energiavdelningen/Linda Kumpula, tfn +358 29 506 0125.			
Förläggare	Arbets- och näringsministeriet		
Distribution/ beställningar	Elektronisk version: julkaisut.valtioneuvosto.fi Beställningar: julkaisut.laakset.valtioneuvosto.fi		

Description sheet

Published by	Ministry of Economic Affairs and Employment		5 April 2019
Authors	KYT2018 Steering Group Chairperson Jarkko Kyllönen, Secretary Kari Rasilainen		
Title of publication	KYT2018 Finnish Research Programme on Nuclear Waste Management 2015–2018 – Final Report		
Series and publication number	Publications of the Ministry of Economic Affairs and Employment 2019:20		
Register number		Subject	Energy
ISBN PDF	978-952-327-408-2	ISSN (PDF)	1797-3562
Website address (URN)	http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-327-408-2		
Pages	165	Language	Finnish
Keywords	Nuclear energy, nuclear safety, research		
Abstract <p>KYT2018 was the research programme of the Ministry of Employment and the Economy (now Ministry of Economic Affairs and Employment), where the objective has been to ensure that the authorities have access to sufficient levels of such nuclear expertise and preparedness that are needed for comparison of different nuclear waste management methods and technologies. Research directly related to licensing applications belongs to other programmes by the authorities and those responsible for nuclear waste management. KYT2018 research programme was conducted 2015–2018.</p> <p>The starting point for public research programs on nuclear safety is that they create the conditions for maintaining the knowledge required for the continued safe and economic use of nuclear power, developing new know how and participating in international collaboration. Nuclear research organizations in Finland have been an important asset for the ministries, Radiation and Nuclear Safety Authority (STUK), power companies and Posiva.</p> <p>The content of the KYT2018 research programme was composed of nationally important research topics, which are the long-term safety of nuclear waste management, technologies in nuclear waste management and nuclear waste management and society. The research programme had 32 research and infra projects. KYT2018 research programme also functioned as a discussion and information-sharing forum for the authorities, those responsible for nuclear waste management and the research organizations, which helps to make use of the limited research resources. The programme aimed for its part to develop national research infrastructure, ensure the continuing availability of expertise, further high-level scientific research and increase general knowledge of nuclear waste management. According to the international review of the research programme, the aims were met.</p> <p>The final report has been authored on behalf of the Steering Group of the research programme. MEAE contact: Energy Department/Linda Kumpula, tel. +358 29 506 0125.</p>			
Publisher	Ministry of Economic Affairs and Employment		
Distributed by/ publication sales	Electronic version: julkaisut.valtioneuvosto.fi Publication sales: julkaisutilaukset.valtioneuvosto.fi		

Sisältö

Esipuhe	9
1 Johdanto	10
2 Tutkimusohjelman organisointi	12
2.1 Tavoitteet ja niiden saavuttaminen	12
2.2 Tutkimusohjelman arviointi	18
2.3 Tutkimusohjelman hallinnointi	19
2.4 Yhteydenpito	21
2.4.1 Seminaarit	21
2.4.2 Seurantakokoukset	22
2.4.3 Muu yhteydenpito	23
3 Tutkimukset aihepiirissä Ydinjätehuollon teknologiat 2015–2018	24
4 Tutkimukset aihepiirissä Ydinjätehuollon pitkäaikaisturvallisuus 2015–2018	27
4.1 Turvallisuusperustelu	27
4.2 Puskuri- ja täyteaineiden toimintakyky	28
4.3 Kapselin toimintakyky	30
4.4 Mikrobiologian vaikutukset	31
4.5 Muut turvallisuustutkimukset	33
5 Tutkimukset aihepiirissä Ydinjätehuolto ja yhteiskunta 2015–2018	37
6 Hanketiivistelmät	39
6.1 Ydinjätehuollon teknologiat	39
6.1.1 Kehittyneet polttoainekierrot – Uudet säädettävät erotusmateriaalit – SERMAT (Hanke 1)	39
6.1.2 Kehittyneet polttoainekierrot – Skenaario- ja inventaarilaskenta – KOSKI (Hanke 2)	42
6.1.3 VAIkeasti Mitattavien radionuklidien MittAusmenetelmät – VAMMA (Hanke 3) ..	45

6.2	Turvallisuusperustelu.....	48
6.2.1	Koordinoitu hanke – TURMET – Turvallisuusperustelun metodiikan systematisointi (Hankkeet 4–5).....	48
6.3	Puskuri- ja täyteaineiden toimintakyky.....	52
6.3.1	Koordinoitu hanke – THEBES – THMC Behaviour of the Swelling Clay Barriers – Paisuvien savipuskurien THMC käyttäytyminen (Hankkeet 6–9)	52
6.3.2	Bentoniitin eroosio ja radionuklidien vuorovaikutus – BENTO (Hanke 10).....	61
6.3.3	Bentoniitin paisuntapaine – UEFBENT (Hanke 11)	66
6.4	Kapselin toimintakyky.....	70
6.4.1	Koordinoitu hanke – Kapseli (Hankkeet 12–16)	70
6.5	Mikrobiologian vaikutukset	78
6.5.1	Koordinoitu hanke – Ydinjätteen Loppusijoituksen Mikrobiologiset Riskit – MILORI (Hankkeet 17–19)	78
6.5.2	Ravinteet, energia ja kaasut kalliobiosfäärissä – RENGAS (Hanke 20)	86
6.6	Muut turvallisuustutkimukset.....	90
6.6.1	Radionuklidien kulkeutuminen kallioperässä – Kallion in-situ tutkimukset – RAKU (Hanke 21).....	90
6.6.2	C-14 Vapautuminen Metallijätteestä – HIILI-14 (Hanke 22)	93
6.6.3	Rakovirtaus-, matriisidiffuusio- ja sorptiomallinnus hila-Boltzmann menetelmällä – JYFLKYT (Hanke 23)	96
6.6.4	Hiilen Sorptio ja Kemialliset Muodot Kallioperässä – C14ROCK (Hanke 24)	99
6.6.5	Applicability of Geopolymers in Nuclear Waste Management – GeoP-NWM (Hanke 25).....	104
6.6.6	Ydinjätteen Riskien Arviointiin Soveltuvan Radioekologisen Mallintamisen Kehittäminen Maa- ja Vesiekosysteemeissä – YRMA (Hanke 26)	107
6.6.7	Biosfäärimallinnuksen vaihtoehtoiset menetelmät ja niiden arviointi – VABIA (Hanke 27)	109
6.6.8	Kallion Rakopintojen Mekaaniset Ominaisuudet – KARMO II-III (Hankkeet 28–29)	112
6.6.9	Rakosimulaattori joka kunnioittaa rakojen mitattuja pituus- ja suuntajakaumia – ROSA (Hanke 30)	115
6.7	Ydinjätehuoltoon liittyvä yhteiskuntatieteellinen tutkimus.....	117
6.7.1	Turvallisuuden hallinta Suomen ja Ruotsin ydinjäteregioneissa – SAFER (Hanke 31)	117
6.8	Ydinjätehuollon infrahankkeet.....	121
6.8.1	Radiological Laboratory Commissioning – RADLAB (Hanke 32)	121
Liite 1	KYT2018 hankkeet 2015–2018.....	125
Liite 2	KYT2018 julkaisut ja opinnäytteet 2015–2018.....	127

ESIPUHE

Kansallinen ydinjätehuollon tutkimusohjelma KYT2018 on ollut käynnissä vuosina 2015–2018. Tutkimusohjelma on jatkoa useille julkishallinnon koordinoituille ydinjätehuollon tutkimusohjelmille, joista ensimmäinen käynnistyi jo vuonna 1989.

Tutkimusohjelman tavoitteena on ollut ydinjätehuollon asiantuntemuksen varmistaminen ensisijaisesti viranomaisten käytettäväksi ydinjätehuollon erilaisten toteutustapojen ja menetelmien arviointiin ydinenergialaissa määriteltyjen tavoitteiden mukaisesti. Lisäksi tutkimusohjelman tarkoituksena on ollut tukea ja täydentää jätehuoltovelvollisten omia tutkimusohjelmia sekä edistää yhteydenpitoa viranomaisten, jätehuoltovelvollisten ja tutkijoiden kesken.

KYT2018-tutkimusohjelman loppuraportissa esitellään tutkimusohjelmalle vuonna 2014 asetetut tavoitteet, tavoitteiden saavuttaminen sekä toteutetut tutkimushankkeet aihepiireittäin. Lisäksi loppuraportissa esitellään tutkimusohjelman hallinnointi ja arviointi sekä pidetyt seminaarit ja seurantakokoukset.

Loppuraportti on laadittu työ- ja elinkeinoministeriön 4.8.2014 nimittämän tutkimusohjelman johtoryhmän ja sitä avustavien tukiryhmien toimesta. Tutkimushankkeiden tiivistelmät ovat hankepäälliköiden laatimia. Ministeriö kiittää toimitustyöstä erityisesti johtoryhmän puheenjohtajaa Jarkko Kyllöstä STUK:sta, tutkimusohjelman koordinaattoria Kari Rasilaista ja Aku Itälää VTT:stä sekä tukiryhmien puheenjohtajia Petri Jussilaa ja Ville Koskista STUKista. Työ- ja elinkeinoministeriön yhteyshenkilönä toimi Linda Kumpula.

Helsingissä joulukuussa 2018

Työ- ja elinkeinoministeriö

Energiaosasto

1 Johdanto

Kansallinen ydinjätehuollon tutkimusohjelma KYT2018 käynnistyi vuonna 2015. Tutkimuskausi päättyi vuoden 2018 lopussa.

KYT2018-tutkimusohjelman lähtökohdat perustuvat ydinenergialakiin (990/1987), joka korostaa viranomaisten tutkimustarpeita. Ydinenergialain mukaan tutkimustoiminnan tarkoituksena on ”varmistaa, että viranomaisten saatavilla on riittävästi ja kattavasti sellaista ydinteknistä asiantuntemusta ja muita valmiuksia, joita tarvitaan ydinjätehuollon erilaisten toteutustapojen ja menetelmien vertailuun” (53 b §).

Tutkimusohjelman sisällössä pyrittiin etsimään kansallisen osaamisen kannalta keskeisiä tutkimuskohteita, joita olisi selvitettävä niiden tärkeyden takia. Keskeisimmiksi katsottuihin aihepiireihin kaavailtiin koko tutkimuskauden kattaneita koordinoituja hankkeita. Ydinjätehuollon valmistelutöihin, toteutukseen tai viranomais-tarkastukseen suoraan kuuluvat aiheet on rajattu tutkimusohjelman ulkopuolelle. Tällä tutkimusalueen rajauksella pyrittiin siihen, että tutkimusohjelmaan osallistuminen ei vaarantaisi ydinjätehuollon toimijoiden (esim. STUK ja Posiva) riippumattomuusodotuksia.

KYT2018-tutkimusohjelman tavoitteena on ollut toimia lisäksi viranomaisten, ydinjäteorganisaatioiden ja tutkimuslaitosten välisenä keskustelu- ja tiedonvälitysförumina. Näin on pyritty luomaan edellytyksiä rajallisten tutkimusresurssien tehokkaalle hyödyntämiselle, jotta yksittäisiin tutkimushankkeisiin voidaan saada riittävän monipuolinen ja poikkitieteellinen tutkimusryhmä. Tehokkaalla tiedonvaiholla ja koordinoituilla hankkeilla on pyritty vähentämään mahdollista päällekkäistä tutkimusta ja koordinoimaan esimerkiksi kansainvälisiä hankkeita.

KYT2018-tutkimusohjelmassa on ollut mahdollista toteuttaa hankkeita myös VYR:n ja muiden suomalaisten tai ulkomaisten rahoittajien yhteisrahoituksella. Esimerkiksi

EU-hankkeisiin osallistumista varten tarvitaan useimmiten myös kansallista osarahoitusta. Tutkimuskaudella yksi tutkimusohjelman hanke osallistui suoraan EU-hankkeeseen¹.

¹ Hiili-14 hanke osallistui EU-hankkeeseen CAST (CARbon-14 Source Term).

2 Tutkimusohjelman organisointi

Tutkimusohjelman organisoinnin ja käytännön työskentelyn keskeinen lähtökohta on, että rahoitettava hankekokonaisuus on valittu vuosittain julkisen hankehaun perusteella.

2.1 Tavoitteet ja niiden saavuttaminen

KYT2018-tutkimusohjelman keskeisimmät tavoitteet on kirjattu puiteohjelmaan². Tutkimusohjelman puiteohjelman mukaiset keskeiset aihepiirit ovat 1) ydinjätehuollon teknologiat, 2) ydinjätehuollon pitkäaikaisturvallisuus ja 3) ydinjätehuolto ja yhteiskunta. Ydinjätehuollon pitkäaikaisturvallisuuden tutkimuksessa on viisi osa-aluetta, jotka ovat turvallisuusperustelu, puskuri- ja täyteaineiden toimintakyky, kapselin toimintakyky, mikrobiologian vaikutukset ja muut turvallisuustutkimukset. Vuodesta 2016 lähtien tutkimusohjelmaan on kuulunut aihepiiri ydinjätehuollon infrahankkeet, joka on liittynyt VTT:n Ydinturvallisuustalon käyttöönottoon; infra-hankkeita ei ole mainittu puiteohjelmassa.

Tutkimusohjelman johtoryhmä on vuosittain laatinut puiteohjelmaa täsmentävän ajankohtaisen evästyksen hankehakuun. Evästyksellä on täsmennetty ennen kaikkea ydinjätteiden loppusijoituksen pitkäaikaisturvallisuuden aihepiiriä ja ydinjätteiden loppusijoitustilan teknisten vapautumisesteiden merkitystä. Evästyksessä on esitetty myös yleisiä tavoitteita. Esimerkiksi vuoden 2018 hankehaussa painotettiin tavoitetta saattaa käynnissä olevat hankkeet loppuun ennen tutkimuskauden loppumista.

² TEM, 2014, Kansallinen ydinjätehuollon tutkimusohjelma KYT2018. Puiteohjelma tutkimuskaudelle 2015–2018, Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja Energia ja ilmasto 43/2014.

Tutkimushankkeiden arviointikriteerit ovat olleet 1) merkittävyys ja hyödynnettävyys, 2) verkottuminen ja integroituvuus, 3) koulutusvaikutus ja tieteelliset ansiot, 4) KYT-hankkeissa tai muissa yhteyksissä osoitettu tuloksellisuus ja 5) kustannusten ja työmäärän realistisuus.

Kohdistumista on arvioitu ydinenergialain tutkimusrahoituksen myöntämiselle asettamien tavoitteiden mukaan ja suhteessa tutkimusohjelman johtoryhmän vuositaiseen evästyksen. Hyödynnettävyyttä on arvioitu ensisijaisesti ydinjätehuollon turvallisuusarvioinnin kannalta kuitenkin niin, että myös muuta mahdollista hyötyä loppukäyttäjälle on voitu arvioinnissa perustella.

Verkottuminen ja integroituvuus ovat tarkoittaneet, että tutkimushankkeilta on odotettu verkottumista alan toimijoiden kesken, koottuja yhteisiä hankkeita ja ehyitä kokonaisuuksia.

Koulutusvaikutuksessa on otettu huomioon sekä kvantitatiivinen vaikutus (väitökset, diplomityöt, gradut) että kvalitatiivinen vaikutus, jolla tarkoitetaan asiantuntemuksen luomista Suomeen ydinjätehuollon keskeisille osaamisalueille.

Tieteellisinä ansioina on otettu huomioon julkaisut ja posteriesitykset tms. Kvalitatiivisessa tarkastelussa on kiinnitetty huomiota mm. tutkimuksen luonteeseen (kokeellinen tutkimus, perustutkimus, mallinnus), innovatiivisuuteen (uudenlaiset koejärjestelyt, uudet tekniikat) ja laajuuteen (esim. näytteenoton laajuus).

Tuloksellisuudessa on arvioitu hankkeen etenemistä. Uusien hankkeiden kohdalla on otettu huomioon muissa tutkimusyhteyksissä aikaansaadut tulokset.

Kustannusten ja työmäärän realistisuudella on tarkoitettu sitä, ovatko kustannukset ja työmäärä tasapainossa ja ovatko työmäärä ja käytettävissä oleva aika tasapainossa sekä ovatko työmäärä ja henkilöresurssit tasapainossa.

Tutkimuskaudella on ollut käynnissä yhteensä 32 tutkimushanketta, jotka ovat olleet joko erillisiä ja uusia hankkeita tai ne ovat olleet jatkoa aiemmin käynnissä olleille hankkeille. Koko tutkimuskauden on ollut käynnissä 25 hanketta. Tutkimushankkeet ovat ensisijaisesti liittyneet ydinjätehuollon turvallisuuden arviointiin. Aihepiirissä ydinjätehuollon teknologiat on ollut kolme hanketta, aihepiirissä

ydinjätehuolto ja yhteiskunta on ollut yksi hanke ja aihepiirissä ydinjätehuollon infrahankkeet on ollut yksi hanke (vuosina 2016–2018).

Tutkimushankkeita on ollut käynnissä seuraavasti: 29 tutkimushanketta vuonna 2015, 30 tutkimushanketta vuonna 2016, 29 tutkimushanketta vuonna 2017 ja 29 tutkimushanketta vuonna 2018. Hankeluettelo on liitteessä 1. Vuonna 2018 tutkimusohjelmassa oli kaksi pienhanketta, jotka toteutettiin johtoryhmän päätöksellä julkisen hankehaun ulkopuolella. Myös pienhankkeet katetaan tässä loppuraportissa.

Tutkimuskaudella Valtion ydinjätehuoltorahasto ohjasi rahaa KYT2018-ohjelmaan noin 11,6 miljoonaa euroa. Vuonna 2016 mukaan tulleet VTT:n Ydinturvallisuustalon rahoitusjärjestelyt muuttivat hankehaut 3-osaisiksi (kaikille avoin haku ja kaksi vain VTT:lle suunnattua infrahakua). Kaikille avoimiin hakuihin (tutkimushankkeiden, infrastruktuurihankkeiden ja täydennyskoulutuksen aihepiireissä) ohjattiin rahoitusta yhteensä noin 7,5 miljoonaa euroa. Täydennyskoulutushankkeita ei ollut tutkimuskaudella. Vuosittain tutkimukseen ja infrahankeisiin käytettiin noin 1,9 miljoonaa euroa, taulukko 1 ja kuva 1.

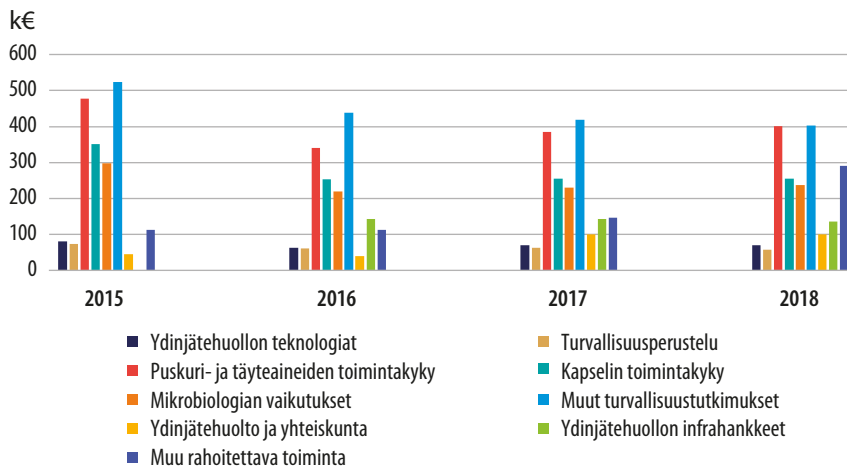
Taulukko 1. VYR-rahoituksen jakautuminen aihepiireittäin 2015–2018.

Tutkimusalue/tuhat euroa	2015	2016	2017	2018
Ydinjätehuollon teknologiat	80	63	70	70
Turvallisuusperustelu	73	61	62	58
Puskuri- ja täyteaineiden toimintakyky	478	341	385	401
Kapselin toimintakyky	351	253	255	255
Mikrobiologian vaikutukset	297	220	230	238
Muut turvallisuustutkimukset	523	439	418	402
Ydinjätehuolto ja yhteiskunta	45	40	100	100
Ydinjätehuollon infrahankkeet	-	143	143	136
Muu rahoitettava toiminta	112	112	146	291
Yhteensä	1959	1672	1809	1951

Keskimäärin VYR-rahoituksen suhteellinen jakautuminen pääaihepiireihin koko tutkimuskaudella on ollut:

- Ydinjätehuollon teknologiat 4 %
- Ydinjätehuollon pitkäaikaisturvallisuus 78 %
- Ydinjätehuolto ja yhteiskunta 4 %
- Ydinjätehuollon infrahankkeet 6 %
- Muu rahoitettava toiminta 8 %.

Ydinjätehuollon infrahankkeet aloitettiin kesken tutkimuskauden v. 2016 ja aloittamisen jälkeen niiden rahoitusosuus on ollut noin 8 %. Muu rahoitettava toiminta kattaa mm. tutkimusohjelman hallinnon ja v. 2018 myös johtoryhmän tilaamien pienhankkeiden kulut, sillä pienhankkeet on käytännössä toteutettu hallintohankkeen alihankintoina.



Kuva 1. VYR-rahoituksen jakautuminen aihepiireittäin 2015–2018.

Tutkimusohjelman hankkeet ovat julkaisseet tutkimuskaudella yhteensä 71 arvo-julkaisua (vertaisarvioitua tieteellistä lehtiartikkelia), 215 konferenssijulkaisua tai työraporttia, sekä 36 opinnäytetyötä (kts. taulukot 2–4). Julkaisujen nimet on raportoitu tutkimusohjelman vuosikatsauksissa ^{3,4,5}. Tutkimushankkeet ovat raportoineet vuosikatsauksissa myös hyväksymisvaiheessa olevista julkaisuista sekä käynnissä olevista opinnäytetöistä, joita ei ole huomioitu seuraavissa taulukoissa⁶. Yhteenvedo julkaisuista on luetteloitu liitteessä 2. Osa julkaisuista on perustunut osin KYT2018-ohjelmaa edeltävässä KYT2014-ohjelmassa tehtyyn työhön ja vastaavasti osa KYT2018-ohjelmassa tehdystä työstä julkaistaan KYT2018-ohjelmaa seuraavassa KYT2022-ohjelmassa.

Taulukko 2. Arvojulkaisujen lukumäärät aihepiireittäin 2015–2018.

Julkaisut aihepiireittäin/kpl	2015	2016	2017	2018
Ydinjätehuollon teknologiat	-	-	1	1
Turvallisuusperustelu	-	-	1	-
Puskuri- ja täyteaineiden toimintakyky	3	4	1	3
Kapselin toimintakyky	4	3	6	4
Mikrobiologian vaikutukset	8	2	3	3
Muut turvallisuustutkimukset	3	7	6	4
Ydinjätehuolto ja yhteiskunta	-	-	3	1
Ydinjätehuollon infrahankkeet	-	-	-	-
Muu rahoitettava toiminta	-	-	-	-
Yhteensä	18	16	21	16

³ KYT2018 Kansallinen ydinjätehuollon tutkimusohjelma 2015–2018, Vuosikatsaus 2015.

⁴ KYT2018 Kansallinen ydinjätehuollon tutkimusohjelma 2015–2018, Vuosikatsaus 2016.

⁵ KYT2018 Kansallinen ydinjätehuollon tutkimusohjelma 2015–2018, Vuosikatsaus 2017.

⁶ Konferenssiesitykset julkaistaan usein arvojulkaisuina: näissä tapauksissa konferenssijulkaisuja ei ole mainittu (ts. julkaisu kirjataan vain kerran).

Taulukko 3. Konferenssijulkaisujen ja työraporttien lukumäärät aihepiireittäin 2015–2018.

Julkaisut aihepiireittäin /kpl	2015	2016	2017	2018
Ydinjätehuollon teknologiat	1	5	5	8
Turvallisuuserustelu	-	3	2	-
Puskuri- ja täyteaineiden toimintakyky	9	10	4	4
Kapselin toimintakyky	8	9	13	8
Mikrobiologian vaikutukset	9	8	12	8
Muut turvallisuustutkimukset	13	12	6	11
Ydinjätehuolto ja yhteiskunta	6	4	10	13
Ydinjätehuollon infrahankkeet	-	6	5	-
Muu rahoitettava toiminta	-	2	-	1
Yhteensä	46	59	57	53

Taulukko 4. Opinnäytteiden lukumäärät aihepiireittäin 2015–2018.

Opinnäytteet aihepiireittäin /kpl	2015	2016	2017	2018
Ydinjätehuollon teknologiat	-	-	-	-
Turvallisuuserustelu	-	-	-	-
Puskuri- ja täyteaineiden toimintakyky	2	2	3	2
Kapselin toimintakyky	1	1	1	-
Mikrobiologian vaikutukset	1	1	2	-
Muut turvallisuustutkimukset	8	4	4	3
Ydinjätehuolto ja yhteiskunta	-	-	-	1
Ydinjätehuollon infrahankkeet	-	-	-	-
Muu rahoitettava toiminta	-	-	-	-
Yhteensä	12	8	10	6

Yhteensä tutkimuskaudella valmistui 12 väitöskirjaa, joista neljä aihepiiriin Puskuri- ja täyteaineiden toimintakyky (Itälä (2018)⁷, Lavikainen (2016), Matusiewicz (2018), Sun (2016)), yksi aihepiiriin Kapselin toimintakyky (Rajala (2017)), yksi aihepiiriin Mikrobiologian vaikutukset (Purkamo (2015)) ja kuusi aihepiiriin Muut turvallisuus-tutkimukset (Ikonen (2017), Kietäväinen (2017), Kuva (2016), Markovaara-Koivisto (2017), Tuovinen (2016) ja Uotinen (2018)). Väitöstyöt ovat pitkäjänteisiä ja ainakin osa työstä on aloitettu jo ennen KYT2018-ohjelman tutkimuskautta ja niissä voi myös olla muita panostuksia KYT2018-ohjelman ulkopuolelta.

KYT2018-tutkimusohjelmassa ovat olleet mukana seuraavat tutkimusorganisaatiot: VTT, Aalto-yliopisto, Helsingin yliopisto, Geologian tutkimuskeskus, Jyväskylän yliopisto, Itä-Suomen yliopisto, Numerola Oy, Tampereen teknillinen yliopisto ja Tampereen yliopisto.

2.2 Tutkimusohjelman arviointi

Tutkimusohjelman arviointi toteutettiin 31.5-1.6.2017 Helsingissä. Arviointiryhmä kävi läpi tutkimusohjelman asiakirjoja ja haastatteli tutkimusohjelman organisaatiota, tutkimushankkeiden projektipäälliköitä ja muita avainhenkilöitä. Arviointiryhmä kokosi työnsä tuloksena arviointiraportin, josta on julkaistu erillinen raportti ministeriön julkaisusarjassa⁸.

Arviointiraportissa esitettiin arvioinnin tulokset, haasteet ja suositukset sekä yleiset johtopäätökset. Arvioinnin mukaan KYT2018-tutkimusohjelmalla on kattava ja syvälinen osaaminen ydinjätehuollosta ja tutkimusohjelman hallinto on toteutettu tehokkaasti. Tutkimusohjelman tukiryhmät ovat luoneet aktiivisen kansallisen tutkimusyhteisön ja tutkimusohjelma edistää keskustelua viranomaisten, ydinjätehuollon vastuuorganisaatioiden ja tutkijoiden välillä. Arvioinnin mukaan KYT2018-tutkimusohjelman tutkimusaiheet on kuitenkin rajattu liian tiukasti vain viranomaisia hyödyttäväksi ja tutkimus on eriytynyt liiaksi muusta Suomessa toteutettavasta

⁷ Ellei muuta ilmoiteta, kirjallisuusviitteet tässä raportissa viittaavat Liitteen 2 julkaisuluetteloon.

⁸ Pellegrini, D., Simic, E. & Salomaa, R. 2017. KYT2018 Review Report. MEAE guidelines and other publications 9/2017, 29 s.

ydinjätehuollon tutkimuksesta. Arviointiryhmä näki tarpeelliseksi vahvistaa tutkimusohjelman tieteellistä ohjausta ja kohdistaa tutkimusta tarkemmin vielä avoinna oleviin haasteisiin. VTT:n Ydinturvallisuustalon infrastruktuurin hyödyntäminen nähtiin hyödylliseksi sekä tutkimuslaitteiden että tutkimusyhteisön näkökulmasta ja samalla talon hyödynnettävyys nähtiin myös lähivuosien haasteeksi. Arviointiryhmä totesi, että tutkimushankkeiden rahoituksen leikkaukset tutkimusohjelman aikana olivat hankaloittaneet tutkimuksen tekemistä. Myös tutkimusrahoituksen myöntäminen vain vuoden jaksoissa ja vasta tutkimusvuoden maaliskuussa todettiin haasteeksi.

KYT2018-tutkimusohjelman johtoryhmä kävi arvioinnin tulokset läpi syksyllä 2017 ja totesi, että haasteet ja suositukset on tarkoituksenmukaista käsitellä KYT2022-tutkimusohjelman suunnitteluryhmässä. Suunnitteluryhmä aloitti toimintansa syksyllä 2017 ja jätti kesällä 2018 ehdotuksensa tutkimusohjelman puiteohjelmaksi⁹ ja tutkimusohjelman organisoimiseksi KYT2022-tutkimusohjelman johtoryhmälle, joka hyväksyi ehdotuksen syksyllä 2018. Puiteohjelmassa tutkimusohjelman aihealuetta on laajennettu hyödyttämään viranomaisten lisäksi myös toiminnanharjoittajia ja heidän toteuttamaa ydinjätehuollon tutkimusta. Tutkimuksen tieteellisen ohjauksen tärkeyttä on korostettu tutkimustyön hyödynnettävyyden lisäämiseksi. Rahoituksen kehittämiseen liittyviä haasteita on käsitelty TEM:ssä, ja ministeriö on perustanut hankkeen ratkaisuvaihtoehtoja läpikäymiseksi ja tarvittaessa ydinenergialain muuttamiseksi. Uudistusten vaikutusten arviointi on mahdollista vasta KYT2022-tutkimusohjelman aikana.

2.3 Tutkimusohjelman hallinnointi

Tutkimusohjelman työskentely on perustunut tutkimusohjelman johtoryhmän, kolmen tukiryhmän, koordinaattorin ja tutkimushankkeiden keskinäiseen yhteistyöhön ja työnjakoon. Tutkimusohjelman johtoryhmä on kokoontunut yleensä 5 kertaa vuodessa (v. 2018 vain 4 kertaa, koska hankehakua ei toteutettu tutkimuskauden viimeisenä vuotena).

⁹ TEM 2018. Kansallinen ydinjätehuollon tutkimusohjelma KYT2022 – Puiteohjelma tutkimuskaudelle 2019–2022. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja 24/2018, 56 s.

Johtoryhmä on vastannut tutkimusohjelman strategisista linjauksista ja toiminut tutkimusohjelman hallintoa ja tutkimuksen yleisiä suuntaviivoja koordinoivana elimenä. Johtoryhmä on ohjannut tutkimusohjelman suunnittelua ja seurannut tutkimustulosten laatua. Johtoryhmä on laatinut vuosittain suositukset ministeriölle VYR-rahoituksen suuntaamisesta ydinjätehuollon tutkimukseen.

Tutkimusohjelman tukiryhmät ovat kokoontuneet 1–2 kertaa vuodessa. Tutkimusohjelman tukiryhmillä on ollut seuraava keskinäinen työnjako: Tukiryhmä I: Puskuri, täyteaineet ja kapseli; Tukiryhmä II: Turvallisuuden arviointi ja innovaatiot ja Tukiryhmä III: Yhteiskunta ja ihminen.

Tukiryhmät ovat arvioineet vuosittain yksityiskohtaisesti hanke-esitykset ja laatineet arvionsa pohjalta johtoryhmälle vuosittaisen yhteenvetoraportin, kukin arvioimistaan hanke-esityksistä. Tukiryhmät ovat seuranneet tarkoituksenmukaista sisäistä työnjakoa noudattaen tutkimushankkeiden etenemistä. Käytännön seurantatyötä varten tukiryhmät ovat jakaneet tutkimushankkeet aihepiiriin mukaan seurantarhyymiin, jotka ovat kokoontuneet kerran vuodessa.

Tutkimusohjelman koordinaattorina on toiminut Teknologian tutkimuskeskus VTT.

Tutkimusohjelman johtoryhmään nimitettiin edustajat työ- ja elinkeinoministeriöstä, Säteilyturvakeskuksesta, sosiaali- ja terveysministeriöstä, ympäristöministeriöstä ja ydinjätealan organisaatioista. Tutkimusohjelman johtoryhmän puheenjohtajana on toiminut Jarkko Kyllönen (Säteilyturvakeskus). Muut johtoryhmän jäsenet ovat olleet Mikko Paunio (sosiaali- ja terveysministeriö), Miliza Malmelin¹⁰ (ympäristöministeriö), Sami Hautakangas (Fortum Power and Heat Oy), Pekka Viitanen¹¹ (Teollisuuden Voima Oy), Marjut Vähänen¹² (Posiva Oy) ja Jaana Avolahti¹³ (työ- ja elinkeinoministeriö). Mia Ylä-Mella¹⁴ (Fennovoima Oy) on toiminut asian tuntijajäsenenä.

¹⁰ 4.3.2016 asti. 5.9.2017 lähtien Susanna Wähä. 2.1.2018 lähtien Sami Rinne.

¹¹ 27.2.2015 lähtien Nina Paaso.

¹² 4.7.2016 lähtien Anne Kontula.

¹³ 22.1.2016 lähtien Linda Kumpula.

¹⁴ 10.1.2016 lähtien Ville Koskinen. 31.7.2017 lähtien Heikki Hinkkanen.

Varajäseninä ovat olleet Kaisa-Leena Hutri (Säteilyturvakeskus), Jari Keinänen (sosiaali- ja terveysministeriö), Magnus Nyström¹⁵ (ympäristöministeriö), Kristiina Söderholm (Fortum Power and Heat Oy), Liisa Heikinheimo¹⁶ (Teollisuuden Voima Oyj), Lasse Koskinen (Posiva Oy), Jorma Aurela (työ- ja elinkeinoministeriö) ja Hanna Virlander¹⁷ (Fennovoima Oy).

Johtoryhmä on nimennyt jäsenet tukiryhmiin Säteilyturvakeskuksesta, työ- ja elinkeinoministeriöstä, ympäristöministeriöstä, Fennovoima Oy:stä, Fortum Power and Heat Oy:stä, Posiva Oy:stä ja Teollisuuden Voima Oyj:stä.

2.4 Yhteydenpito

2.4.1 Seminaarit

KYT2018-tutkimusohjelman tiedonvaihtoa varten järjestettiin yhteensä 13 seminaaria. Tutkimusohjelman aihepiirejä käsiteltiin yhdeksässä temaattisessa seminaarissa. Niissä keskityttiin yhteen aiheeseen kerrallaan ja esitettiin siihen liittyviä näkökulmia tutkimuslaitosten ja tulosten loppukäyttäjien kannalta. Tutkimusohjelmaa ja kaikkia sen aihepiirejä sekä tutkimushankkeita käsiteltiin ohjelmakauden puolivälissä ja lopussa järjestetyissä seminaareissa. Tällaisia seminaareja järjestettiin kaksi. KYT2018-ohjelman puiteohjelman esittelyseminaari järjestettiin ennen tutkimusohjelman ensimmäistä hankehakua. Vastaavasti järjestettiin KYT2022-puiteohjelmaluonnoksen esittelyseminaari yhdessä KYT2022-ohjelman kanssa.

Seminaareista tiedotettiin useille sidosryhmille. Tilaisuudet olivat avoimia kaikille asiasta kiinnostuneille. Temaattisiin seminaareihin osallistui yleensä 10–30 henkilöä ja osanottajia oli myös tutkimusohjelman ulkopuolelta. Luettelo seminaareista on esitetty taulukossa 5. Seminaarien aineistot ovat arkistoituina tutkimusohjelman verkkosivulla.

¹⁵ 2.1.2018 alkaen Kati Vaajasaari.

¹⁶ 9.1.2017 asti. 1.9.2017 lähtien Arto Kotipelto.

¹⁷ 17.12.2015 lähtien Ville Koskinen. 10.1.2016 lähtien Heikki Hinkkanen. 31.7.2017 lähtien Tuire Haavisto.

Taulukko 5. KYT2018-tutkimusohjelman seminaarit.

Seminaarin aihe	Aika	Paikka
KYT2018-puiteohjelmaluonnoksen esittely	22.8.2014	STUK, Helsinki
Kallioperän rikkonaisuuden mallinnus	3.12.2015	GTK, Espoo
Kuparin korroosio, 1. seminaari	15.12.2016	Aalto-yliopisto, Espoo
Bentoniittitutkimus, 2. workshop	16.12.2016	VTT, Espoo
Ohjelmakauden puoliväliseminaari	7.4.2017	Finlandia-talo, Helsinki
Ydinjätehuollon yhteiskunnallinen hyväksyttävyys	6.10.2017	TEM, Helsinki
Kuparin korroosio, 2. seminaari	2.11.2017	Aalto-yliopisto, Espoo
Bentoniittitutkimus, 3. workshop	8.11.2017	Aalto-yliopisto, Espoo
Kalliorakojen numeerinen mallinnus	1.12.2017	GTK, Espoo
Ydinjätteen loppusijoituksen mikrobiologia	24.4.2018	VTT, Espoo
KYT2022-puiteohjelmaluonnoksen esittely	20.8.2018	VTT, Espoo
Ydinjätehuollon sosiaalinen toimilupa	10.10.2018	VTT Espoo
Ohjelmakauden päätösseminaari	29.1.2019	Finlandia-talo, Helsinki

2.4.2 Seurantakokoukset

Tutkimushankkeiden edistymisen seurantaan varten tutkimusohjelmassa jaettiin tutkimushankkeet aihepiiriin mukaisesti seurantaryhmiin¹⁸. Kaikki seurantaryhmiin (1) – (8) kuuluvat hankkeet tapasivat tukiryhmänsä kerran vuodessa. Tavoitteena on ollut saada tietoa viimeisimmistä tutkimustuloksista ja lisäksi kuulla tutkijoiden mielipiteitä, käsityksiä ja toiveita sekä tuoda esille loppukäyttäjien tarpeet ja toiveet hankkeiden sisältöön ja suuntaukseen liittyen. Seurantaryhmän (9) hanke järjesti kaksi yhteiskuntatieteellistä seminaaria; seurantaryhmä ei muuten kokoontunut hankeseurantatarkoituksessa.

Ydinjätehuollon infrahankkeiden aihepiirissä olleen hankkeen edistymisen seuranta on toteutettu yhteistyössä SAFIR2018-tutkimusohjelman kanssa. SAFIR2018-ohjelmassa on ollut infrahankkeiden seurantaan erikoistunut seurantaryhmä, jonka

¹⁸ Vuonna 2018 seurantaryhmiä oli yhdeksän. Tukiryhmä I:n seurantaryhmiä olivat (1) puskuri- ja täyte-aineiden toimintakyky, (2) kapselin toimintakyky ja (3) kallioperä. Tukiryhmä II:n seurantaryhmiä olivat (4) turvallisuusperustelu, (5) nuklidikulkeutuminen, (6) mikrobiologian vaikutukset, (7) biosfääri, sekä (8) ydinjätehuollon teknologiat. Tukiryhmän III seurantaryhmä oli (9) yhteiskuntatiede.

kokouksiin KYT2018-johtoryhmän puheenjohtajalle ja tutkimusohjelman koordinaattorille varattiin edustus.

2.4.3 Muu yhteydenpito

Tutkimusohjelman kotisivut (kyt2018.vtt.fi) on ollut pääasiallinen yhteydenpito- ja tiedonvälitysväline. Kotisivuilla on saatavana kaikki tutkimusohjelman julkaisema materiaali. Avoimien kotisivujen lisäksi tutkimusohjelmalle on rakennettu johtoryhmän ja tukiryhmien käyttöön suojattu intranet.

Tutkimusohjelma on julkaissut vuosittain vuosisuunnitelmat ja vuosikatsaukset. Osavuosisikatsauksia on laadittu kaksi kappaletta/vuosi. Johtoryhmän kokousten päätöksistä ja ajankohtaisista asioista on laadittu tiedotteet verkkosivulle.

Johtoryhmä on pitänyt yhteyttä myös suoraan tutkimushankkeisiin kutsumalla hankepäälliköt esittelemään hankkeensa tilannetta johtoryhmän kokouksiin. Hankeesittelyt pidettiin kerran vuodessa lukuun ottamatta vuotta 2017, jolloin toteutettiin tutkimusohjelman kansainvälinen arviointi.

3 Tutkimukset aihepiirissä

Ydinjätehuollon teknologiat

2015–2018

Puiteohjelman mukaan viranomaisten saatavilla tulee olla ajantasaista tietoa ja asiantuntemusta tutkittavista ja kehitteillä olevista geologisen loppusijoituksen vaihtoehtoista sekä asiantuntemusta Suomessa toteutettavan ydinjätehuollon erilaisten toteutustapojen ja menetelmien vertailuun. Eri ydinjätteiden huoltovaihtoehtoja arvioitaessa ja tarkennettaessa saattaa tulla esiin mahdollisuus tai tarve tutkia uusia tai vaihtoehtoisia teknisiä ratkaisuja. Uusia ja vaihtoehtoisia teknologioita tutkimalla parannetaan suomalaisen ydinjätehuollon toteutusvarmuutta, mikäli nyt päävaihtoehtona oleva geologinen loppusijoitus ei toteutuisi kaavailtuna tai mikäli kehitetään uusia menetelmiä esimerkiksi syntyvän jätteen määrän vähentämiseksi tai käsittelemiseksi. Puiteohjelman mukaan aihepiiriin kohdistuva tutkimus toteutuu parhaiten osallistumalla kansainväliseen yhteistyöhön. Suomalaisten tutkimusryhmien osallistuminen kansainvälisiin tutkimusohjelmiin edellyttää kuitenkin omaa osaamista.

Ohjelmassa toteutuneet hankkeet kohdistuivat eräisiin keskeisiin puiteohjelmassa mainittuihin osa-alueisiin. Aihepiiriin kuului kaksi hanketta, jotka käsitelivät kehittyneitä polttoainekiertoja eli käytetyn polttoaineen jälleenkäsittelyyn perustuvia ydinjätehuollon ratkaisuja ja nuklidierotusta. VTT:n hanke Kehittyneet polttoainekierrat – Skenaario- ja inventaarilaskenta (KOSKI) ja HYRLin hanke Kehittyneet polttoainekierrat – Uudet säädettävät erotusmateriaalit (SERMAT) olivat molemmat jatkoa aiemmalle ohjelmakaudelle.

HYRL:n hanke kattoi yhden jatko-opiskelijan nuklidierotustekniikkaan liittyvän kokeellisen tutkimuksen. Hankkeen tavoitteena oli radiokemian tohtorin kouluttaminen erotus- ja transmutaatiotekniikan alalle. Tutkimustyön kohteena oli uusien

nanohuokoisien metallifosfaatti-ioninvaihtimien tutkimus ja kehittäminen aktinidien erotukseen käytetystä ydinpolttoaineesta tai uusien nesteuuttomenetelmien synnyttämistä sekundäärijäteliuoksista. Lisäksi kohteena oli kehittyneiden polttoainekiertojen kansainvälisen tutkimuksen seuranta ja tiedonvälitys koskien uusia erikoistekniikoita. VTT:n hankkeen kohteena oli hankkia ja ylläpitää kotimaista kehittyneiden polttoainekiertojen mallinnusosaamista sekä seurata alan kansainvälistä kehitystä ja tutkimusta. Kansainvälisessä asiantuntijaryhmässä tehtiin käytetyn polttoaineen annosnopeuden vertailulaskuja.

Ohjelmassa mukana olleiden hankkeiden luonne on puiteohjelman linjauksen mukaisesti ollut kansainvälisen tiedon seuranta konkreettisen oman toiminnan kautta. Hankkeet ovat onnistuneet tuottamaan viranomaisten saataville asiantuntemusta Suomessa toteutettavan ydinjätehuollon erilaisten toteutustapojen ja menetelmien vertailuun. Pääasiassa hankittu tieto käsittelee syntyvän jätteen määrän ja aktiivisuuden vähentämistä ja sen vaikutusta geologisen loppusijoituksen toteutukseen.

Ohjelmassa mukana olleiden hankkeiden organisaatioilla on pitkä yhteinen KYT-historia, jonka aikana hankkeiden välinen yhteistyö on ollut melko tiivistä. Tiedon seurannan ja asiantuntemuksen ylläpidon vuoksi kansainvälinen verkottuminen on ollut hankkeiden keskeinen tavoite.

Hankkeiden koulutusvaikutus on ollut kohtuullinen. Hankkeiden keskeinen sisältö on ollut asiantuntijoiden koulutus oman työn ja kansainvälisen tiedon seurannan kautta. Hankkeet ovat tuottaneet useita laitosraportteja sekä konferenssiesityksiä. HYRLin hankkeen kautta valmistuu yksi väitöskirja erotustekniikan alalle.

Hankkeiden tuloksellisuus ja kustannukset ovat olleet keskimääräisiä. Molemmat hankkeet ovat ohjelmakauden aikana kärsineet merkittävistä rahoitusleikkauksista.

Edellä mainittujen lisäksi aihepiirissä toteutettiin vuonna 2018 VTT:n ja HYRLin yhteinen pienhanke Vaikeasti mitattavien radionuklidien mittaamenetelmät (VAMMA). Hanke oli esiselvitysluonteinen, ja siinä kartoitettiin keskeisimpien vaikeasti mitattavien radionuklidien tutkimusvalmiudet kotimaisissa laboratorioissa VTT:llä, HYRLissä, Fortumilla, Teollisuuden voimassa ja STUKissa. Vaikeasti mitattavia radionuklideja ovat lähinnä ydinvoimaloiden purkujätteen beeta-aktiiviset radionuklidit, joiden mittaaminen edellyttää jätteenäytteiden vaativaa radiokemiallista erottelua.

Pienhanke kohdistui puiteohjelmaan ja pyrki verkottumaan kartoittamalla alan keskeisten toimijoiden tietotaitoa. HYRLissä laadittiin aihepiiristä pro gradu -työ, jonka valmistuminen siirtyi vuoteen 2019. Aihepiirin tutkimus jatkuu tulevalla ohjelmakaudella.

4 Tutkimukset aihepiirissä Ydinjätehuollon pitkäaikais- turvallisuus 2015–2018

4.1 Turvallisuusperustelu

Puiteohjelman mukaan viranomaisten käytettävissä on oltava riittävästi korkeatasoista luvanhakijasta riippumatonta tietoa turvallisuusperustelun laatimisen periaatteista, ajattelutavoista ja rajoituksista, koska viranomaisten tehtäviin kuuluu arvioida luvanhakijan turvallisuusperustelu. Puiteohjelma esittää tarpeen muodostaa tätä monitahoista ja vaativaa aihepiiriä käsittelevä koordinoitu hanke, jonka tarkoituksena on tuottaa uusia asiantuntijoita turvallisuusperustelun laatimiseen ja arviointiin ja lisätä osaamista turvallisuusperusteluun sisältyvien metodiikkojen osalta. Tämän osaamisen pohjalta voidaan puiteohjelman mukaan myöhemmin erikseen tarkastella eri loppusijoitushankkeiden toteutettavuutta.

Aihepiiristä ohjelmaan osallistui koordinoitu hanke TURMET – Turvallisuusperustelun metodiikan systematisointi, joka koostui VTT:n ja Aalto-yliopiston osahankkeista; VTT toimi koordinaattorina. Koordinoidussa hankkeessa perehdyttiin ydinjätteiden loppusijoituksen turvallisuusperustelun metodiikkaan erityisesti skenaarioanalyysin näkökulmasta, arvioitiin epävarmuuksien huomioon ottamisen vaikutuksia turvallisuusanalyysin menetelmiin ja kehitettiin epävarmuuksien arviointiin teknisiä työkaluja. Aallon osahankkeessa kehitettiin ja sovellettiin skenaarioanalyysiin ja todennäköisyyspohjaiseen riskianalyysiin perustuvia menetelmiä ja työkaluja ydinjätehuollon pitkäaikaisturvallisuuden arvioinnin tueksi.

Toteutunut koordinoitu hanke oli varsin pienimuotoinen kahden tutkijan projekti ja kohdistui siten vain rajoitettuun osaan puiteohjelmassa käsitellyistä mahdollisista aiheista. Hankkeessa tehdyt kirjallisuusselvitykset turvallisuusperustelusta ja skenaarioiden muodostamisesta sekä luotu verkkosivusto kohdistuivat puiteohjelman sisältöön luoden pohjaa turvallisuusperustelun rakenteen ja esittämistapojen kehittämiseen laajempien piirien ymmärrettäväksi. Hankkeessa kehitetty skenaarioiden muodostamisen työkalu kohdistuu hyvin puiteohjelman tavoitteisiin kehittää turvallisuusperusteluun sisältyviä metodiikkoja. Työkalun sovellettavuus ja hyödynnettävyys jäänee kuitenkin odotettua vaatimattommaksi.

Hankkeen pienuudella oli heikentävä vaikutus myös muihin arviointikriteereihin kuten verkottumiseen. Verkottumistavoitteet olivat huomattavasti suuremmat kuin mitä toteutuneet resurssit lopulta mahdollistivat.

Kokoonsa nähden koulutusvaikutukset olivat hyvät. Hankkeessa koulutettiin turvallisuusperustelun alalle uusi asiantuntija molemmissa osahankkeissa. Tuloksina syntyi kirjallisuusselvityksiä turvallisuusperusteluun ja skenaarioanalyysiin liittyen sekä vuonna 2019 valmistuva väitöskirja skenaarioanalyysin aihepiiristä. Hankkeelle perustettiin myös oma verkkosivusto.

Tuloksellisuus oli varsinkin Aalto-yliopiston osa-hankkeessa esimerkillinen. Väitöskirjan valmistuminen yhden nelivuotiskauden työn perusteella on ansiokas suoritus.

Kustannuksiltaan Aalto-yliopiston osahanke oli poikkeuksellisen edullinen.

4.2 Puskuri- ja täyteaineiden toimintakyky

KBS-3 -konseptissa puskuri- ja täyteaineiden toimintakyvyn luotettava arviointi ratkaisee pitkälti koko turvallisuusperustelun luotettavuuden. Sitä varten viranomaisien käytettävissä on oltava riittävästi korkeatasoista osaamista näiden aineiden toimintakyvystä ja sen vaikutuksesta pitkäaikaisturvallisuuteen. Puiteohjelmaan (KYT2018) on kirjattu porrastettu tarve kohdistaa tutkimusta puskuri- ja täyteaineiden osalta. Ensiksi on panostettava toimintakyvyn varmistavien luonnontieteellisesti perusteltujen konseptualisointien ja niistä johdettujen matemaattisten ja laskennallisten mallien kehittämiseen. Toiseksi niiden avulla on arvioitava bentoniitin

pitkäaikaiskäyttäytymistä. Tätä tarvetta varten ohjelmassa rahoitettiin yhtä koordinoitua hanketta sekä kahta yksittäistä hanketta.

Koordinoidussa hankkeessa THEBES (THMC Behaviour of the Swelling Clay Barriers) tutkittiin ja kehitettiin THMC-mallia bentoniitille. Koordinoidun hankkeen vetovuonna oli Aalto-yliopisto. Muita osallistuvia organisaatioita olivat Jyväskylän yliopisto, VTT ja Numerola Oy.

Koordinoidun hankkeen ohella ohjelmakaudella oli Itä-Suomen yliopiston hanke Bentonite swelling pressure (UEFBENT) ja Helsingin yliopiston Bentoniitin eroosio ja radionuklidien vuorovaikutus (BENTO). Itä-Suomen yliopiston hanke keskittyi bentoniitin atomitason mallinnukseen ja molekyyliidynamiikkaan. Helsingin yliopiston hanke keskittyi nimensä mukaisesti bentoniitin eroosioon ja radionuklidien kulkeutumiseen.

Hankkeiden laajuus vastasi hyvin puiteohjelmassa laadittua tavoitetta. Hankkeiden edistyminen oli varsinkin ohjelman alussa hidasta merkittävien rahoitusleikkausten vuoksi. Alun hankaluuksien jälkeen hankkeet saivat sopeutettua toimintansa rahoitustasoon, jonka jälkeen hankkeet etenivät vakaasti kohti uusittua tavoitettaan.

Koordinoidussa hankkeessa THEBES saatiin toteutettua THMC-malli kaupallisen mallinnustyökalun pohjalta. Mallissa kemian kytkeytyminen on verrattain rajallista, mallin huomioidessa keskeiset suolat. Mallin kehittämistä varten tarvittua kokeellista tutkimusta on tehty pääosin Jyväskylän yliopistossa KYT2014 kaudella kehitettyyn tomografialaitteistoon perustuvalla koejärjestelyllä. Kokeellisen tutkimuksen pohjalta koordinoitu hanke on saanut kehitettyä mallinnusta luotettavampaan suuntaan hankkeen aikana. Hanke on siten päässyt tavoitteeseensa. THEBES hankkeen yhteydessä osallistujilla on ollut kansainvälistä yhteistyötä useiden eurooppalaisten yliopistojen kanssa.

Itä-Suomen yliopiston hanke on luonut uutta ymmärrystä bentoniitin paisumiskäyttäytymiseen molekyyliatasolla. Molekyyli-tason mallinnus on uusi tutkimusmenetelmä KYT-ohjelmassa, joskin konseptuaalinen malli on vanhempaa perua. Hanke eteni tasaisesti ohjelmakauden mittaan ja pääsi ohjelmakauden päättyessä tavoitteeseensa. Ohjelmakauden päättyessä hanke oli tuottanut toimivan mallin montmorilloniitti levyjen väliseen käyttäytymiseen yksiulotteisessa avaruudessa.

Viranomaistyön kannalta hankkeen tuloksia voidaan osittain hyödyntää Posivan käyttö lupahakemuksen arvioinnissa, mutta lupaprosessin vaiheesta johtuen ei tuloksia ole voitu hyödyntää välittömästi. Tulokset ovat kuitenkin osaltaan lisänneet bentoniitti-materiaalien osaamista ja ymmärrystä joka palvelee loppusijoituksen ilmiöiden tuntemusta ja siten toimii koko alan hyväksi pidemmällä aikavälillä.

Bentoniitti ja täyteaineiden hankkeissa on ohjelmakauden aikana valmistunut useita maisteritutkintoja. Lisäksi kolme hankkeessa mukana ollutta tutkijaa on väitellyt tohtoriksi ja neljäs tohtorintutkinto valmistuu 2019. Hanke on tuottanut opinnäytetöiden lisäksi esitelmiä, postereita ja lehtiartikkeleita. Hankkeessa on nostettu aihepiiriin osaamisen tasoa ja koulutettu aihepiiriin uusia osaajia.

4.3 Kapselin toimintakyky

Puiteohjelman mukaan viranomaisten käytettävissä on oltava riittävästi korkeatasoista osaamista loppusijoituskapselin pitkäaikaiskestävyydestä, siihen vaikuttavista keskeisimmistä tekijöistä sekä pitkäaikaiskestävyyden arvioinnissa sovelletuista menetelmistä. Tähän tarpeeseen osaltaan ovat vastanneet KYT2018-ohjelmassa toteutetut kapselihankeet.

KBS-3 -konsepti perustuu moniestejärjestelmään, jossa on toisiaan täydentäviä vapautumisesteitä. Loppusijoituskapselia pidetään tärkeimpänä yksittäisenä vapautumisesteenä ja sen pitkäaikaisella toimintakyvyllä on suuri merkitys KBS-3 -konseptissa. Loppusijoituskapselin toimintakyvyn tarkastelussa on otettava huomioon sekä mekaaniseen kestävyys- että kemialliseen kestävyys- vaikuttavia asioita.

KYT2018-ohjelmakauden aikana kapselihankeet painottuivat kuparin kemiallisen kestävyys tutkimuksiin. Kapselihankeet muodostivat koordinoitua hankkeen KAPSELI. Koordinaattorina toimi VTT ja muut osallistajat koordinoitua hankkeessa olivat Aalto-yliopistosta sekä VTT:ltä. Ohjelmakauden aikana viisi loppusijoituskapselin kemiallista kestävyys tutkimusta osahanketta, jotka olivat kaikki koko KYT2018-kauden pituisia. Osahankkeista kolme tutkivat eri korroosio-ilmiöitä kahden tutkiessa mikrobitoiminnan vaikutusta kuparin korroosioon.

Mikrobitoiminnan tutkimushankkeista hapellisten olosuhteiden mikrobitutkimus tuli johtopäätökseen, ettei jatkotutkimus tuo enää merkittävää lisätietoa. Muissa hankkeissa saatiin hyviä tuloksia mutta lisätutkimuksen tarvetta jäi edelleenkin. Hankkeissa havaittiin osittain korkeita korroosionopeuksia, mutta niiden osalta syyn oletetaan olevan koejärjestelyissä sekä kokeiden lyhyessä kestossa.

Johtuen Posivan hankkeen luvitustilanteesta ei tuloksia voida välittömästi hyödyntää viranomaistyössä. Lisätiedolle on edelleenkin olemassa tarvetta, mutta jo KYT2018 ohjelmakaudella saatu tutkimustieto auttaa viranomaistyössä sekä luo pohjaa luvanhaltijoiden omille tutkimushankkeille.

KYT-ohjelman yhtenä tavoitteena on uuden asiantuntijapolven kouluttaminen ydinjätehuollon alalle. Kapselitutkimushankkeet tuottivat ohjelmakauden aikana useita opinnäytetöitä (diplomitöitä). Hankkeissa oli tavoitteena saada valmistuneita jäämää tutkuskentälle, mutta ainakin osittain valmistuneet tutkijat ovat siirtyneet teollisuuden puolelle. KAPSELI-hankkeen aikana on valmistunut myös väitöskirja. Ohjelmakauden aikana tehdyt opinnäytetyöt ja uudet loppusijoituskapselin ominaisuuksien ja toimintakyvyn tutkijat täyttivät hyvin koulutusvaikutusta koskevan tavoitteen. Kapselihankkeiden tuloksia julkaistiin opinnäytetöiden lisäksi myös useissa seminaareissa ja konferensseissa sekä vertaisarvioituissa lehtiartikkeleissa. Hankkeiden tieteellisiä ansioita ovat esimerkiksi pitkäkestoisten (useita vuosia) kuparin ja sen hitsausliitosten virumiskokeiden data ja virumisen mallintaminen, ja tietoa kuparin korroosiomekanismeista erilaisissa ympäristöissä sekä pohjaveden mikrobitoiminnan vaikutuksesta kuparin korroosiolle.

4.4 Mikrobiologian vaikutukset

Puiteohjelman mukaan viranomaisen käytettävissä on oltava riittävästi korkeatasoista tietoa mikrobiologisen toiminnan vaikutuksista vapautumisesteiden toimintakykyyn. Puiteohjelma peräänkuuluttaa aihepiiristä koordinoitua hanketta, joka olisi tiiviissä yhteistyössä muiden koordinoitujen hankkeiden kanssa sekä kansainvälisessä yhteistyössä, jotta turvallisuusperustelun sekä teknisten esteiden tutkimuksen erityistarpeet saadaan tunnistettua.

Mikrobiologian aihepiirissä oli mukana neljä hanketta. Koordinoidun hankkeen Ydinjätteen loppusijoituksen mikrobiologiset riskit (MILORI) muodostivat VTT:n osahankkeet Matala- ja keskiaktiivisen jätteen loppusijoituksen mikrobiologia (MAKERI), Matala- ja keskiaktiivisen metallijätteen mikrobiologinen korroosio (CORLINE) ja Mikrobiyhteisöjen rikkimetabolian loppusijoitusolosuhteissa (GEOBIOKIERTO). Lisäksi mukana oli itsenäisenä hankkeena GTK:n Ravinteet, energia ja kaasut kalliobiosfäärissä (RENGAS).

MAKERI-hankkeessa mm. arvioitiin matala- ja keskiaktiivisen jätteen geologiseen loppusijoitukseen liittyviä mikrobiologisia riskejä, jotka voivat johtaa vapautumisestaiden toimintakyvyn heikkenemiseen, kaasun vapautumiseen ja radionuklidien kulkeutumiseen loppusijoitustilasta biosfääriin. CORLINE-hankkeessa arvioitiin esim. biofilmien muodostumista ja mikrobiologisen korroosion riskiä metallisille materiaaleille sekä kehitettiin reaaliaikaista in situ -monitorointitekniikkaa korroosion ja vesikemian muutosten yhteyksien mittaamiselle. GEOBIOKIERTO-hankkeessa selvitettiin kokeellisesti loppusijoitustilojen pohjavesien mikrobiyhteisöjen vaikutusta rikin kiertoon sekä rikkiyhdisteiden muodostumisnopeuteen eri olosuhteissa, arvioitiin pohjavesien mikrobien ja niiden metaboliatuotteiden vaikutuksia bentoniittipuskurin fysikaaliselle rakenteelle ja toimintakyvylle. RENGAS-hankkeessa tutkittiin biogeokemiallisesti tärkeiden alkuaineiden esiintymistä ja liikkumista kallio- pohjavesissä, syvän biosfäärin energialähteitä ja energian siirtymistä mikrobien katalysoimissa hapetus-pelkistysreaktioissa.

Mikrobiologiahankkeet ovat kohdistuneet hyvin puiteohjelmaan: aihepiiristä muodostettiin koordinoitu hanke, joka oli yhteistyössä erityisesti teknisiä vapautumisestaidia koskevien koordinoitujen hankkeiden kanssa sekä teki kansainvälistä yhteistyötä. Aihepiiriin tutkimus on tuottanut korkeatasoista tietoa mikrobiologisen toiminnan vaikutuksista vapautumisestaidien toimintakykyyn. Saatua tietoa on hyödynnettävissä ainakin turvallisuusanalyysissä, mallinnuksessa, sekä turvallisuusperustelun arvioinnissa.

Mikrobiologiahankkeet ovat tehneet sekä keskenään että muiden KYT-hankkeiden kanssa kiitettävää yhteistyötä, kotimainen ja kansainvälinen verkottuminen on ollut erinomaista.

Hankkeet ovat lisänneet merkittävästi asiantuntemusta ja niiden koulutusvaikutus on ollut huomattava. Tutkimukset ovat olleet osana kahta valmistunutta väitöskirjaa ja yhtä maisterintutkintoa, kansainvälisiä julkaisuja on syntynyt useita.

Tutkimusten tuloksellisuus on ollut hyvä ottaen huomioon aihepiiriin liittyvät erityispiirteet kuten sen lyhyt tutkimushistoria, monitieteellisyys, kokeellisten menetelmien aikaa vievä kehitystyö sekä yleensäkin kokeellisen työn suuri osuus.

Aihepiirin tutkimusten kustannus on varsin korkea, sillä suuri osa siitä on luonteeltaan kokeneiden asiantuntijoiden kokeellista työtä. RENGAS-hankkeen KYTin ulkopuolelta saaman rahoituksen osuus on ollut kiitettävän korkea.

4.5 Muut turvallisuustutkimukset

Puiteohjelmaan on linjattu, että arvioitaessa ydinjätehuollon turvallisuutta yleensä ja geologisen loppusijoituksen turvallisuutta erityisesti, tietoja tarvitaan useilta tieteenaloilta ja myös puiteohjelmassa mainittujen koordinoitujen hankkeiden lisäksi. Näiden koordinoitujen hankekokonaisuuksien ulkopuolella olevien hankkeiden aihepiirit vaihtelevat luonnollisista syistä. Sisällöltään ne kohdistuivat puiteohjelmassa mainittuihin aihepiireihin kattamatta kuitenkaan kaikkea erikseen puiteohjelmassa lueteltua.

Tukiryhmän I hankkeet

Tukiryhmän I seurantavastuulla olleita kalliorakoilua ja kalliorakoilun kuvantamis- ja mallinnustekniikoita tutkittiin KYT2018 ohjelmassa kolmessa hankkeessa KARMO II, KARMO III ja ROSA. Lisäksi tukiryhmä I seurasi geopolymeeritutkimusta.

Aalto-yliopiston vetämissä hankkeissa Kallion rakopintojen mekaaniset ominaisuudet (KARMO II ja KARMO III), jotka olivat keskenään jatkohakkeita, tutkittiin kallion rakopintojen teknisii ominaisuuksia. Tutkimusta varten tehtiin maailmanluokassa ensikertaisia kokeita suuressa mittakaavassa. Tutkimuksen lopputuloksena on syntynyt TEKESin rahoittama spinoff-hanke, jossa kehitettyä tekniikkaa pyritään kaupallistamaan. Hankkeessa on valmistunut väitöskirja, sekä uusia tutkimusmenetelmiä joita voidaan käyttää suurten pintojen tutkimiseen ja niiden teknisten

ominaisuuksien mallinnukseen. Tutkittavan pinnan kasvaessa joudutaan havainnointipisteitä vähentämään, jotta tutkimusaika saadaan pidettyä järkevänä sekä tuotettava data määrä käyttökohteeseen sopivana. Tekniikalla on sovelluskohteita myös loppusijoitushankkeiden ulkopuolella, esim. infrarakentamisessa ja kaivos-teollisuudessa. Hanke on onnistunut hyvin tavoitteissaan ja tuottanut alalle uusia osaajia (kandi- ja diplomitoita, väitöskirja).

GTK:n hankkeessa Rakosimulaattori joka kunnioittaa rakojen mitattuja pituus ja suuntajakaumia (ROSA) pyrittiin kehittämään menetelmiä maanalaisen rakoilun ennustamiseksi maanpinnalla havaittujen rakojen perusteella. Lisäksi havaittujen rakojen perusteella pyrittiin arvioimaan rakojen geologisia ikäsuhteita, jotta alueen geologista aktiivisuutta voitaisiin paremmin ennakoida. Merkittävänä osana työtä on havaittujen rakojen ryhmittely, jotta havaintojen käsittely tulisi helpommaksi. Hanke onnistui tavoitteissaan osittain, sillä ikäsuhteiden määrittely osoittautui odotettua hankalammaksi. Hankkeessa valmistui väitöskirja ja diplomityö.

Geopolymeerien hyödyntämistä voimalaitosjätteen kiinteytyksessä tutkittiin VTT:n vetämässä hankkeessa Applicability of Geopolymers in Nuclear Waste Management (GeoP-NWM). Geopolymeerit ovat epäorgaanisia vaihtoehtoja Portland-sementille, ja voivat mahdollisesti tarjota ympäristöystävällisen vaihtoehdon kiinteytykseen. Hanke alkoi kirjallisuusselvityksellä ja eteni ohjelman aikana pienen mittakaavan koepalojen valmistamiseen. Hanke nosti Suomessa esiin kansainvälisesti mielenkiintoisen vaihtoehdon kiinteytykseen. Hankkeen pieni koko huomioiden olivat tulokset hyviä ja ovat hyödynnettävissä luvanhaltijoiden ja viranomaisen toimesta.

Tukiryhmän II hankkeet

Tukiryhmän II seurantavastuulla olleista aihepiireistä erityisesti puiteohjelmassa korostettuja ja ohjelmassa toteutuneita ovat radionuklidien kulkeutuminen, ¹⁴C-isotooppiin liittyvät epävarmuudet sekä kulkeutuminen biosfääriässä. Toisistaan poikkeavien hankkeiden koulutusvaikutukset olivat moninaiset. Hankkeissa on koulutettu alalle uusia toimijoita ja ne ovat yhdessä tuottaneet opinnäytetöitä. Useat hankkeet ovat työllistäneet myös kokeneempia tutkijoita.

Radionuklidien kulkeutumista sivuavia aihepiirejä käsiteltiin Helsingin yliopiston hankkeessa Radionuklidien kulkeutuminen kallioperässä; Kallion in situ tutkimukset (RAKU), VTT:n hankkeessa C-14 vapautuminen metallijätteestä (HILLI-14), Helsingin

yliopiston hankkeessa Radiohiilen kemialliset muodot ja sorptio kallioperässä (C14ROCK) sekä Jyväskylän yliopiston hankkeessa Rakovirtaus-, matriisidiffuusio- ja sorptiomallinnus hila-Boltzmann-menetelmällä (JYFLKYT).

RAKU-hankkeessa mm. tutkittiin radionuklidien pidättymistä ja kulkeutumista kiteisessä kivessä kenttä- ja laboratoriokokein, kehitettiin ja sovellettiin reaktiivisia kulkeutumismalleja. HILLI-14-hankkeessa selvitettiin voimalaitos- ja käytöstäpoistojätteen aktiivisissa metallikomponenteissa olevan C-14 -isotoopin vapautumista pohjaveteen loppusijoitusolosuhteissa, sen vapautumisnopeutta sekä veteen muodostuvia liuenneita ja kaasumaisia hiilen kemiallisia olomuotoja. C14ROCK-hankkeessa tutkittiin käytetystä ydinpolttoaineesta peräisin olevan radiohiilen kemiallisia muotoja ja näiden muutoksia sen kulkeutuessa kallioperän kautta biosfääriin, tutkittiin bakteerien vaikutusta metaanimuotoisen hiilen muuttumisessa karbo-naattimuotoon sekä tutkittiin bakteerien kykyä muodostaa kalsiittia kallioperäolosuhteissa. JYFLKYT-hankkeessa mallinnettiin kulkeutumista kallioperän raoissa ja viivästyistä matriisidiffuusion ja sorption vaikutuksesta.

Kalliokulkeutumisen ja C-14-isotooppiin liittyvien epävarmuuksien tutkimus kohdistuvat hyvin puiteohjelman tavoitteisiin. Radionuklidien kulkeutumiseen liittyvien hankkeiden hyödynnettävyys näkyy erityisesti turvallisuusanalyysissä ja sen tukemiseen tarvittavassa mallintamisessa, jolloin tutkimusten pitkäaikaisturvallisuusmerkitys on huomattava ja niiden tuloksilla voi olla vaikutusta turvallisuusperustelun oletusten ja tulosten arviointiin.

Kulkeutumiseen liittyvien hankkeiden verkottuminen on ollut kohtuullista. Yhteistyö on näkynyt sekä ohjelman sisällä että kansainvälisissä hankkeissa.

Kulkeutumiseen liittyvien hankkeiden koulutusvaikutus on ollut vaihteleva. Asiantuntijoita on koulutettu tärkeälle alalle. Aihepiiristä on tullut yksi väitöskirja ja toinen on valmistumassa vuonna 2019. Yksi väitöstyö jäi valitettavasti kesken tutkijan poistuttua ohjelmasta kesken ohjelmakauden.

Kulkeutumiseen liittyvien hankkeiden tuloksellisuus ja kustannusten realistisuus on myös ollut vaihteleva.

Biosfääri-ilmiöitä käsiteltiin Itä-Suomen yliopiston hankkeessa Ydinjätteen riskien arviointiin soveltuvan radioekologisen mallintamisen kehittäminen maa- ja

vesiekosysteemissä (YRMA) ja Tampereen teknillisen yliopiston hankkeessa Biosfäärimallinnuksen vaihtoehtoiset menetelmät ja niiden arviointi (VABIA). YRMA-hankkeessa kehitettiin makean veden radioekologista mallintamista ja sen käyttöä loppusijoituksen mahdollisten riskien arviointiin, kehitettiin menetelmiä pienten säteilyannosten vaikutusten tutkimiseksi luonnon eliöissä. VABIA-hankkeessa luotiin yksinkertaisia biosfäärikulkeutumis- ja annosmalleja ja sovellettiin niitä KPA-loppusijoituksen aiheuttamien annosten arvioimiseksi.

Biosfääri-hankkeiden aiheet kohdentuvat hyvin puiteohjelmaan ja niiden tulokset ovat merkittäviä. Tulokset ovat hyödynnettävissä arvioitaessa loppusijoituksen turvallisuusanalyysin lähtötietoja ja sen tuloksia.

Biosfääri-hankkeiden verkottuminen on ollut vaatimatonta, sillä ne eivät olleet yhteistyössä muiden KYT-hankkeiden kanssa tai kytköksissä kansainvälisiin hankkeisiin.

Biosfääri-hankkeiden koulutusvaikutus on keskimäärin ollut hyvä. UEF-hanke tuottaa sisältöä kahteen väitöskirjaan, joista toinen on valmistunut ohjelmakauden aikana. Kansainvälisiä julkaisuja on tullut molemmista hankkeista.

Biosfääri-hankkeiden tuloksellisuus on ollut vaihtelevaa. UEF-hankkeella on ajoittain ollut aikatauluongelmia ja TTY-hanke oli vuoden poissa ohjelmasta hankemuksen myöhästymisen vuoksi.

Biosfääri-hankkeiden kustannukset ovat tuloksiin nähden olleet keskimääräisiä.

5 Tutkimukset aihepiirissä

Ydinjätehuolto ja yhteiskunta

2015–2018

Tutkimusohjelman yhteiskunnallisen tutkimuksen tarkoituksena on tukea päätöksentekoa ja sen valmistelua. Ydinjätehuollossa tehtävät ratkaisut vaikuttavat hyvin pitkälle tulevaisuuteen. Ydinjätehuolto vaatii toteutuakseen paitsi teknistä osaamista myös poliittista ja laajempaa yhteiskunnallista hyväksyntää. Ydinjätehuollon luvitus tapahtuu Suomessa vaiheittain alkaen periaatepäätöksestä, jossa ydinjätehuollon ratkaisuja arvioidaan yhteiskunnan kokonaisedun kannalta. Valtioneuvostossa tehtäviin päätöksiin vaikuttavat koko yhteiskunnan arvot ja odotukset.

Tutkimusohjelmassa pidettiin tärkeinä aiheina eri toimijoiden ja ryhmien käsityksiä ydinjätehuollosta ja erityisesti käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituksesta. Tee-maa voitiin lähestyä mm. eri toimijoiden riippumattomuuden näkökulmista. Kiinnostavia aiheita olivat mm. eettinen ja julkinen keskustelu, ydinjätehuollon pitkään ajalliseen keston liittyvät kysymykset ja yhteys ydinenergian tuotantoon. Pitkään ajalliseen keston liittyvät kysymykset sukupolvien välisestä oikeudenmukaisuudesta, mahdollisista pitkän aikavälin kustannuksista ja tiedon luotettavuudesta ja säilymisestä pitkällä aikavälillä.

Tutkimusohjelmassa rahoitettiin vuosina 2015–2018 Tampereen yliopiston yhteiskunnallista tutkimushanketta Governing Safety in Finnish and Swedish Nuclear Waste Regimes (SAFER), jossa vertailtiin Suomessa ja Ruotsissa käytyä julkista keskustelua ajankohtaisista käytetyn ydinpolttoaineen lupamenettelyistä ja suhtautumista hankkeiden eettisiin ja pitkäaikaiseen keston liittyviin haasteisiin. Hankkeessa selvitettiin mahdollisten suomalaisten loppusijoituslaitosten sijaintikuntien näkemyksiä eettisistä kysymyksistä ja loppusijoituslaitosten lukumääristä.

Hankkeessa myös vertailtiin Eurajoen ja Östhammarin kuntien toimintatapoja käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoitushankkeissa. Lisäksi hankkeessa tarkasteltiin sosiaalisen toimiluvan soveltuvuutta Suomen ydinjätehuoltoon kansainvälisen vertailun avulla.

Yhteiskunnallisen tutkimuksen tuloksia voidaan hyödyntää arvioitaessa ydinjätehuollon yhteiskunnallista hyväksyttävyyttä ja yhteiskunnan yleistä tiedon tarvetta. Tutkimustulosten perusteella voidaan myös tuoda esille lisätutkimuksia vaativia aiheita ja saada uusia näkökulmia ja hyviä toimintatapoja. Tutkimustoiminnalla tuodaan ydinjätehuollon yhteiskunnallisen tutkimuksen alalle myös uusia asiantuntijoita ja ylläpidetään verkostoja alan kansallisten ja kansainvälisten tutkijoiden kanssa. Yhteiskunnallinen tutkimus ydinjätehuollosta on kansainvälisesti merkittävää ja tutkimuksen tuloksia julkaistaan myös kansainvälisissä alan julkaisuissa.

6 Hanketiivistelmät

6.1 Ydinjätehuollon teknologiat

6.1.1 Kehittyneet polttoainekierrot – Uudet säädettävät erotusmateriaalit – SERMAT (Hanke 1)

Risto Koivula¹⁹, Elmo Wiikinkoski, Risto Harjula, HYRL

Tutkimusaihe

Kehittyneellä polttoainekierrolla tarkoitetaan tulevien ydinreaktorien polttoaineen mahdollisimman tehokasta, turvallista ja taloudellista käyttöä. Polttoaineen tehokkaampaan käyttöön liittyy esim. nykyisissä kevytvesireaktoreissa syntyvän plutoniumin käyttäminen suljettua polttoainekiertoa hyödyntävien nopeiden neljännen sukupolven hyötöreaktoreissa. Ydinjätteen loppusijoituksen kannalta tärkeä osa on sellaisten menetelmien ja laitosten kehittäminen, joissa muut sivuaktinidit (neptunium, amerikium ja curium) sekä eräät pitkäikäiset fissiotuotteet kuten jodi ja teknetium erotetaan ydinjätteestä ja poltetaan vaarattomampaan muotoon. Kehittyneet erotustekniikat antavat mahdollisuuden valita eri alkuaineryhmille niille parhaiten soveltuvan varastointi- ja loppusijoitusvaihtoehdon.

Ydinjätteen sisältämien pitkäikäisten radionuklidien erottelu ja transmutaatio (partitioning and transmutation, P&T) on maailmanlaajuisia uusien sukupolvien ydinvoimateknologian tutkimusta. Riippuen käytetystä tekniikasta, P&T:n arvioidaan vähentävän loppusijoitettavan ydinjätteen radiotoksisuuden 10–100-osaan

¹⁹ Hanketiivistelmissä keskeinen projektiryhmä on mainittu alussa ja projektipäällikkö on lihavoitu. Jos hankkeessa on toiminut useampi projektipäällikkö tutkimuskauden aikana, on kaikki projektipäällikköinä toimineet lihavoitu. Lisäksi koordinoituissa hankkeissa on lihavoitu osaprojektipäälliköt.

käytetyn ydinpolttoaineen suoraan loppusijoitukseen verrattuna. Uusimmissa menetelmissä on usein pyritty käytetyssä ydinpolttoaineessa olevan uraanin ja transuraanialkuaineiden (Np, Pu, Am, Cm) erotteluun yksittäisiksi puhtaiksi fraktioiksi transmutaatiota varten. Kehitetyt, vielä laboratorioasteella olevat menetelmät, ovat muodostuneet erittäin monimutkaisiksi koska eri transuraanien erottaminen toisistaan ja läsnä olevista lantanideista on erittäin vaikeaa. Hydrometallurgisten prosessien haittana on orgaanisten uuttoreagenssien rajoitettu säteilykestävyys, jolloin ne soveltuvat rajoitetusti korkeita aktinidipitoisuuksia sisältävien uusien transmutaatiopolttoaineiden käsittelyyn. Toisen haittapuolena hydrometallurgisissa prosesseissa on suuri sekundäärijäteliuosten määrä.

Hankkeen tarkoituksena on kehittää nesteuuton sijaan epäorgaanisia ioninvaihtimia hyödyntäen menetelmä transuraanien erottamiseen lantanideista. Materiaaleja voidaan käyttää kromatografiakolonneissa, ne kestävät suuria määriä säteilyä ja ovat parhaassa tapauksessa uudelleenkäytettäviä. Lisäksi niitä voidaan transmutaatiotekniikan kehityksestä riippumatta myös hyväksikäyttää nykyisten nesteuuttomenetelmien jatkeena, vähentämään nesteuuttomenetelmän sekundäärisiä jäte-liuosmääriä.

Keskeiset tulokset, käytetyt menetelmät

Hankkeessa tuotettiin yksinkertaisella synteesimuutoksella sarja α -ZrP:n muunnoksia. Tuotteet karakterisoitiin tarkasti lukuisilla menetelmillä niin fysikaalis-kemiallisilta ominaisuuksiltaan (XRD, kiinteän olomuodon NMR, IR, TG, SEM, happovakion määrittäminen) kuin ioninvaihto-ominaisuuksiltaan (Eu:n ja Am:n jakaantumistekijät, erotustekijät, selektiivisyystekijät sekä metallisidostekijät).

Synteesisarjalla saavutettiin Eu/Am-erotuksen kannalta erittäin korkeita erotustekijöitä (max. 90, pH-alueella 0,5-1,5) materiaalien suosiessa Eu:ta. Erotustekijä 5 katsotaan jo hyväksi käytössä olevilla menetelmillä. Käytännön sovellusten kannalta tämä on erinomaista: erotuskolonneista voidaan eluoida Am (kolmenarvoiset aktinidit) jatkoprosessointia ja transmutaatiota varten. Sen sijaan Eu (kolmenarvoiset lantanidit) vahvemmin sitoutuneena voitaisiin jättää kolonnimateriaaliin, joka kiinteänä ja tiiviinä jätemuotona soveltuu hyvin loppusijoitettavaksi.

Materiaali- ja ioninvaihto-ominaisuuksien välisten suhteiden selvittämistä voidaan pitää yhtenä hankkeen tärkeänä tuloksena. Korrelaatiot materiaalin happamuuden, kiteisyyden ja ioninvaihtokyvyn välillä on raportoitu tieteellisessä julkaisussa (Wiikinkoski, ChemistrySelect 2018, 3, 9583-9588).

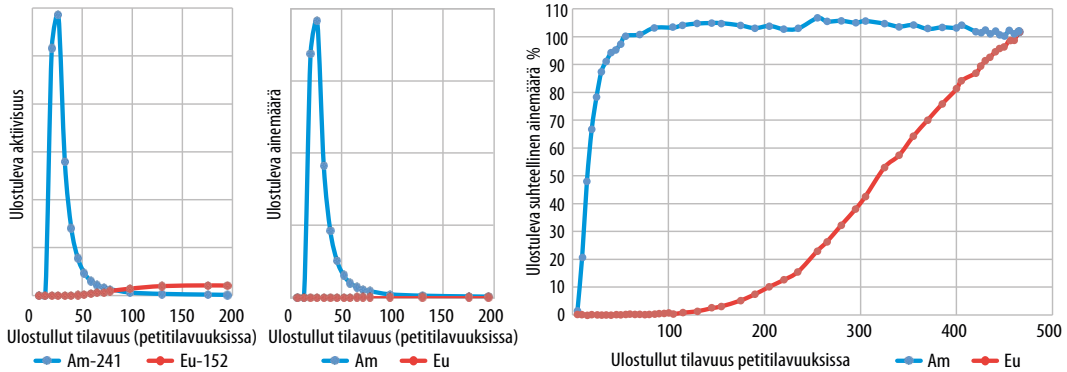
Hankkeen päätuloksena on lähes täydellinen Am/Eu kromatografinen erotus. Lataus/eluutio-vaiheinen erotuskoe (kuva 2) tuotti puhdasta amerikiumia (puhtaus 99,9992 %), kun sitä oli eluoitunut 76 % kolonniin pidäytyneestä määrästä. Eluutiota voitiin jatkaa Am > 99,5 % puhtausasteella niin että 88 % pidäytyneestä Am:stä saatiin eluoitua. 7 % Am:stä jäi pysyvästi kolonniin, eikä eluoitunut edes väkevällä hapolla.

Kun koe suoritettiin jatkuvasyötteisenä, ilman eluenttia, lähtöliuoksen ainemäärä-suhteella Eu/Am 1:1 niin kokeen olosuhteilla 1 kg sorbentilla voidaan puhdistaa 330 L liuosta säilyttäen Am puhtaudella yli 99.5 mol-%:ssa (tai 630 L, 95 mol-%).

Hankkeen keskeisin tulos on tohtorikoulutus ydinjätehuollon ja tarkemmin erotustekniikan alalle. Tohtorikoulutettava Wiikinkoski väittelee alkuvuodesta 2019 alustavalla otsikolla *Ion Exchange in Nuclear Fuel Reprocessing – Zirconium Phosphate Materials for the Separation of Trivalent Actinides and Lanthanides*.

Tulosten merkitys, hyödynnettävyys

Tohtorikoulutuksen myötä edistää alan tietotaitoa Suomessa ja edesauttaa suomalaisten tutkimuslaitosten ja teollisuuden pääsyä mukaan kansainvälisiin P&T-tutkimushankkeisiin. Hankkeessa kehitettyjä materiaaleja sekä osaamista voidaan hyödyntää jo olemassa olevien jäteliuosten käsittelyyn, tai maailmanlaajuisesti ydinpolttolaitosten jälleenkäsittelylaitoksilla tai alan tutkimuksessa. Pitkällä aikavälillä tuloksia voidaan hyödyntää mahdollisissa tulevilla P&T-konseptia käyttävissä ydinpolttolaitteistoissa. Hankkeessa saadut tulokset täydentävät aiempia P&T-konseptiin liittyviä erotustekniikan KYT-hankkeita, ja väitöskirjan myötä eri ohjelmakausien aikaiset tulokset sidotaan helpommin tulkittavaksi kokonaisuudeksi.



Kuva 2. Vasemmalla lataus/eluutio-vaiheinen erotuskoe α -zirkoniumfosfaatilla (petitilavuus 1 ml) ja oikealla vastaava jatkuvasyöttöinen erotuskoe ilman erillistä eluutiota.

6.1.2 Kehittyneet polttoainekierrot – Skenaario- ja inventaarilaskenta – KOSKI (Hanke 2)

Silja Häkkinen, Tuomas Viitanen, Pauli Juutilainen, Antti Rätty, VTT

Ydinjätehuollon uskottavaan toteutukseen liittyy oleellisesti valitun ydinjätehuolto-konseptin vaihtoehtoihin tutustuminen. Suomessa tämä tarkoittaa ydinjätteen suoran loppusijoituksen vaihtoehtoihin perehtymistä. KOSKI-projektissa on tutkittu kehittyneitä polttoainekiertoja, joiden perusajatuksena on ydinjätteen jälleenkäsittely ennen loppusijoitusta. Kehittyneiden polttoainekiertojen tavoitteena on muun muassa ydinjätteen määrän, lämmöntuoton ja vaarallisuuden minimointi sekä ydinainesten ja ydinaseiden leviämisen estäminen. Ydinjätteen määrää, lämmöntuottoa ja vaarallisuutta on mahdollista pienentää transmutaation avulla. Transmutaatio tarkoittaa pitkäikäisten hyvin radioaktiivisten ja paljon lämpöä tuottavien nuklidien polttamista ydinreaktorissa tai alikriittisessä systeemissä stabiileiksi tai lyhytikäisemmiksi nuklideiksi. Parhaiten transmutaatioon soveltuvat kehittyneet neljännen sukupolven nopeat reaktorit. KOSKI-projektin tavoitteena on osaamisen ja työkalujen hankkiminen kehittyneiden polttoainekiertojen mallinnusta varten sekä alan kansainvälisen tutkimuksen seuranta. Osa projektin töistä on toteutettu yhteistyössä KYT-projektin SERMAT (Kehittyneet polttoainekierrot – Uudet säädettävät erotusmateriaalit) kanssa. Osa töistä on puolestaan toteutettu kansainvälisenä yhteistyönä OECD/NEA:n työryhmän WPFC (Working Party on Scientific Issues of the Fuel Cycle) alaisuudessa toimivassa asiantuntijaryhmässä AFCS (Advanced Fuel Cycle Scenarios).

Päätavoitteena projektissa on ollut saavuttaa riittävä osaaminen ja hankkia työkalut, jotka mahdollistavat kansainväliseen tutkimukseen osallistumisen kehittyneiden polttoainekiertojen skenaariomallinnuksessa. Skenaariomallinnuksella tarkoitetaan erilaisten ydinpolttoainekiertojen ja reaktorityyppien mallinnusta ja vertailua. Vertailtavia parametreja on lukuisia, kuten esimerkiksi vertailtavien polttoainekierto- ja reaktorikonseptien tuottaman korkea-aktiivisen jätteen määrä, ydinjätteen lämmöntuotto, fysiillien isotooppien määrä ja laatu, jne. Skenaariomallinnuksen opettelu aloitettiin jo edellisellä ohjelmakaudella hankkimalla Ranskasta CEA:n kehittämä skenaariokoodi COSI. COSI:n KOSKI-projektin budjettiin nähden korkeiden lisenssimaksujen vuoksi siitä luovuttiin KYT2018 ohjelmakauden alussa ja siirryttiin käyttämään unkarilaisten MTA EK:n ja BME NTI:n skenaariokoodia SITON. SITON kykenee, kuten COSI:kin, mallintamaan suuria reaktoriryhmiä ja seuraamaan polttoaineen inventaaria polttoainekierron eri vaiheissa. Tärkeä osa ohjelmaa ovat reaktorimallit, jotka määrittävät, millaisia reaktoreita laskentaohjelmalla on mahdollista mallintaa. Jokaiselle reaktorityypille on laskettava oma reaktorimallinsa. SITON:in kohdalla tämä toteutetaan unkarilaisten kehittämällä FITXS-menetelmällä, joka parametrisoi vaikutusalat käyttäen sovituksessa polttoaineen tarkkaa koostumusta. Parametrisointia varten vaikutusalat ja polttoaineen koostumus on laskettava erillisellä ohjelmalla. Unkarilaiset käyttävät tähän SCALE-ohjelmistoa. VTT:llä pyritään käyttämään AFIR2018 projekteissa MONSOON ja KATVE kehitettyjä Serpentii ja Krakenia.

KYT2018 ohjelmakauden aikana on perehdytty SITON:in käyttöön aluksi vertailemalla sen toimintaa aiemmin käytettyyn COSI-ohjelmaan. Koska SITON:in kehitys oli ohjelmakauden alkaessa vasta melko alussa, ei SITON:issa ollut kuin yksi reaktorimalli nopeille reaktoreille, kaasujäähdytteisen reaktorin (GFR) malli. Tällaista mallia ei puolestaan ollut COSI:ssa, joten vertailu perustui tavallisten termisten kevytvesireaktorien nuklidi-inventaarin seurantaan. Molemmilla laskentaohjelmilla mallinnettiin käytettyyn polttoaineeseen kertyvää plutoniumia ja sivuaktinideja ja todettiin tulosten olevan melko yhtenevät. Plutoniumin kohdalla erot koodien välillä olivat suurimmillaan noin 8 % ja sivuaktinideille jonkin verran korkeammat. Jotta vastaavat vertailut olisivat mahdollisia myös COSI:n lisenssikauden umpeuduttua, tehtiin ohjelmakauden alussa vielä ylimääräisiä laskuja COSI:lla SITON-laskujen myöhempiä validointeja varten.

Päätavoitteen toteutuminen, eli kansainväliseen tutkimukseen osallistuminen skenaariolaskennassa SITON:ia hyödyntäen, edellyttää käytännössä kykyä laskea

uusia reaktorimalleja. Reaktorimallin tehtävä on kertoa, miten polttoaine reaktorissa palaa. Tätä varten tarvitaan ymmärrystä vaikutusalojen käyttäytymisestä palaman funktiona eri polttoaineissa. Ymmärryksen lisäämiseksi vaikutusaloja tarkasteltiin erilaisissa polttoaineissa VTT:n omalla reaktorifysiikkakoodilla Serpent. Näiden tietojen pohjalta aloitetaan reaktorimallin laskenta SITON:ia varten.

Vuodesta 2015 lähtien VTT on osallistunut NEA:n asiantuntijaryhmässä AFCS järjestettyyn käytetyn polttoaineen gamma-annosnopeuden vertailulaskuun. Laskennan tavoitteena oli varmistaa käytetyn polttoaineen riittävä "itsesuojelu" mahdollista ydinmateriaalia havittelevaa varasta vastaan 30 vuoden jäähdytyksen jälkeen ja validoida moderneja laskentaohjelmia gamma-annosnopeuslaskuissa. IAEA ja NRC määrittelevät riittävän itsesuojelun rajaksi 1 Sv/h yhden metrin etäisyydellä polttoainenipusta. Laskenta jakautui kahteen osaan, joissa ensin vertailtiin laskentaohjelmien tuloksia toisiinsa ja sitten laskentatuloksia mittaustuloksiin. Molemmissa osissa laskenta jakautui kolmeen vaiheeseen: i) polttoaineen palaman mallinnus, ii) polttoaineen hajoamisen mallinnus ja gammalähteen muodostus ja iii) annosnopeuslasku. VTT:n laskenta toteutettiin Serpentillä.

Koodivertailussa laskettiin PWR-reaktorissa säteilytettyä UOX- ja MOX-polttoainepippua. Polttoaineen itsesuojelun vaatimuksen havaittiin täyttyvän hyvin. Eri osallistujien laskentakoodit antoivat myös varsin yhteneviä tuloksia. Vuoden 1977 ANSI-konversiokertoimilla laskettuna eri osallistujien annosnopeuksien keskiarvo UOX-nipusta 30 vuoden jäähdytyksen jälkeen oli 5,8 Sv/h keskihajonnalla 0,8 Sv/h. VTT:n Serpentillä laskema tulos oli 5,7 Sv/h. MOX-nipulle annosnopeus oli suurempi ja VTT:n tulos poikkesi hieman enemmän kaikkien osallistujien keskiarvosta.

Koodi-mittaus-vertailussa osallistujat laskivat muutamia erilaisia kahdessa PWR-reaktorissa säteilytettyä UOX-nippuja. VTT:llä laskettiin Yhdysvalloissa Turkey Pointin reaktorissa 1970-luvulla säteilytettyä ja mitattua polttoainenippua. Laskentatulokset osuivat pääosin karkeasti 20 % sisälle mittaustuloksista, mutta myös suurempia eroja oli riippuen mittauskohdasta ja koboltin määrästä polttoainenipun tukikehikossa. Monet muut vertailulaskuun osallistuneet laskivat myös muita nippuja. Erityisesti toisessa Turkey Pointin reaktorissa säteilytetyssä nipussa laskentatulokset poikkesivat huomattavasti mitatuista huolimatta lukuisista erilaisista yrityksistä tarkentaa laskentamalleja. Lopputuloksena osallistujat päätyivät kyseenalaistamaan joitain mittaustuloksia. Myös mitattujen nippujen säteilytyshistorian, geometrian, materiaalikoostumuksen ja mittausolosuhteiden

dokumentoinnissa oli lukuisia puutteita, joiden vuoksi osallistujat joutuivat tekemään valistuneita arvauksia. Yksi näistä oli inconelista valmistetun tukikehikon koboltti-epäpuhtauden määrä. Koboltin aktivaatiolla huomattiin sen alkukonsentraatiosta riippuen olevan mahdollisesti merkittävä vaikutus parin vuoden jäähtymisen jälkeen tehtyihin laskentatuloksiin. Sen todellisesta määrästä mitatuissa nipuissa ei kuitenkaan ollut mitään tietoa ja määrää arvioitiin erilaisten kirjallisuuslähteiden avulla, joita niitäkin on lukuisia.

KOSKI-projektin aikana on osallistuttu NEA:n työryhmän WPFC vuosittaiseen kokoukseen sekä asiantuntijaryhmän AFCS kokouksiin kaksi kertaa vuodessa. Kokoukset ja yhteistyö muiden osallistujien kanssa ovat auttaneet seuraamaan kehittyneissä polttoainekiertoissa tapahtuvaa tutkimusta. Kehittyneiden polttoainekiertojen tutkimuksessa avainasemassa ovat nopeat reaktorit. Joissain maissa on tutkittu lisäksi kiihdytinavusteisia alikriittisiä systeemejä (ADS). Suosituin ja pisimmälle kehitetty nopea reaktori on natriumjäähdyhteinen nopea reaktori (SFR), jonka kehitykseen erityisesti Ranska, Japani ja Venäjä ovat panostaneet. Ohjelmakauden lopuksi tehdään kirjallisuuskatsaus kehittyneiden polttoainekiertojen tutkimuksen nykytilaan yhdessä KYT-SERMAT-projektin kanssa.

6.1.3 VAikeasti Mitattavien radionuklidien MittAusmenetelmät – VAMMA (Hanke 3)

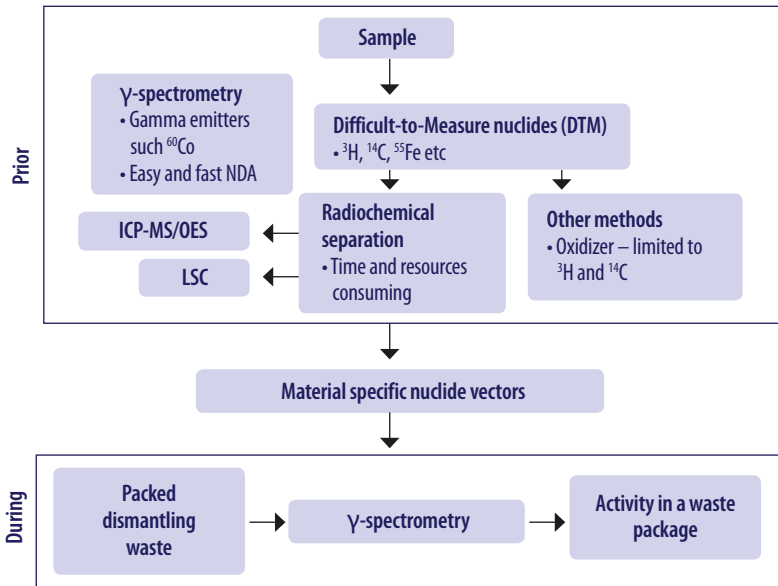
Antti Rätty, Anumaija Leskinen, VTT

Susanna Salminen-Paatero, Risto Koivula, Taneli Iso-Markku, Helsingin yliopisto

Käytöstäpoistettavien ydinlaitosten aktiiviset purkujätteet sisältävät sekä gamma-että beeta-aktiivisia radionuklideja. Säteilyturvakeskuksen ydinvoimalaitosohjeiden mukaisesti pakattujen purkujätteiden aktiivisuustietoina pitää säilyttää pakkauksen kokonaisaktiivisuus ja aktiivisuuden jakautuminen eri radionuklidien kesken eli ns. nuklidivektori. Gamma-aktiivisten radionuklidien mittaaminen on suhteellisen nopeaa ja helppoa, kun taas beeta-aktiivisten nuklidien mittaaminen vaatii näytteiden radiokemiallisia erotteluja. Beeta-aktiiviset nuklidit ovat usein hyvin pitkäikäisiä ja niiden karakterisointi on tärkeää erityisesti purkujätteiden matala- ja keskiaktiivisen jätteen loppusijoituksen turvallisuuden varmistamiseksi.

Koska laitoksen rakenteiden aktivoituminen on lineaarinen prosessi neutronivuon funktiona, laitoksen materiaalikohtaiset nuklidivektorit säilyvät vakioina suurillekin

jättemäärille. Yleisesti käytetty tapa on karakterisoida purkujätteiden aktiivisuus muodostamalla materiaalien nuklidivektorit edustavista näytteistä ennen purun aloittamista ja purun aikana skaalata kokonaisaktiivisuus muodostetusta nuklidi-vektorista mittaamalla vain gamma-aktiivisuudet (kuva 3).



Kuva 3. Materiaalikohtainen nuklidivektorin määrittäminen ja sen käyttäminen purkujätteen karakterisoinnissa.

KYT2018/VAMMA-pienhankkeen tarkoituksena on tutkia purkujätteiden vaikeasti mitattavien beta-aktiivisten nuklidien mittausten menetelmiä jätteiden tärkeimmille radionuklideille.

Menetelmiä selvitettiin kirjallisuuskatsauksena käyttäen tietoina muun muassa Tanskassa purettujen ydinlaitosten käytöstäpoistoprojekteissa kerättyjä kokemuksia.

Tärkeimmät nuklidit ja materiaalit tunnistettiin alan toimijoiden kommentaareista sekä suomalaisten loppusijoituslaitoksien käyttöluvuissa olennaisiksi määritellyistä nuklideista.

Kokeellisena työnä testattiin selvitettyä menetelmää VTT:n näytevaraston paineastiateräsnäytteillä, joista mitattiin HY:n laboratoriossa nuklideja Fe-55, Ni-63 ja Ni-59. Fe ja Ni erotettiin liuotetusta teräksestä omiin fraktioihinsa pääosin anioninvaihdolla ja Fe-55- sekä Ni-63-aktiivisuuspitoisuudet määritettiin nestetuikelaskennalla. Radiokemiallista erotusmenetelmää testattaessa oli erityisesti huomioitava Co-60:n suuri määrä aktivoidussa teräksessä ja Co-60:n tehokas erottaminen Fe- sekä Ni-fraktioista ennen nestetuikelaskentaa oli olennaista häiriöttömän beetaspektin tuottamiseksi. Ni-59 oli tarkoitus määrittää Ni-fraktioista röntgenfluoresenssilaitteistolla, mutta HY:n XRF-laitteisto oli epäkunnossa loppuvuoden 2018. VTT avusti mittauksen suunnittelussa ja testasi omassa laboratoriossaan myös C-14 mittausten menetelmää. VTT:llä mitattiin myös kaikkien paineastiateräsnäytteiden gammaspektrit.

Osana hanketta selvitettiin tärkeimpien suomalaisten laboratorioden (VTT, HY, STUK, Fortum, TVO) tekniset valmiudet beeta-aktiivisten nuklidien mittaukseen. Tiedot selvitettiin sähköisellä yhteydenpidolla sekä laboratoriovierailuilla. Tuloksena listattiin toimijoiden käytettävissä olevat menetelmät ja lähihistorian mittauskokemuksia.

Tutkimuksen tulokset raportoitiin radiokemian pro gradu -työnä sekä laboratorio-raporttina VTT:n tiloissa tehdyistä mittauksista. Osittain ulkoisella rahoituksella projekteissa vierailtiin myös kahdessa kansainvälisessä konferenssissa, joissa pidettiin projektin aihetta käsittelevät esitykset.

VAMMA-projekti oli ensimmäinen käytöstäpoistojätteiden karakterisointiin liittyvä projekti KYT-ohjelmassa ja se oli hyvä alku käytöstäpoistotutkimukselle. Teräksen karakterisointiin liittyvien haasteiden myötä, projektin loppuyhteenvetona voidaan sanoa, että teräksen tutkimista tulisi jatkaa vielä tarkemmin ja lisäksi muitakin käytöstäpoistomateriaaleja tulisi tutkia, jotta analyysimenetelmät saataisiin vakiinutettua kaikille tärkeimmille näytematriiseille ja radionuklideille.

6.2 Turvallisuusperustelu

6.2.1 Koordinoitu hanke – TURMET – Turvallisuusperustelun metodiikan systematisointi (Hankkeet 4–5)

Suvi Karvonen, VTT

Ahti Salo, Edoardo Tosoni, Aalto-yliopisto

Tutkimusaihe

TURMET-hankkeessa tutkittiin ydinjätehuollon turvallisuusperustelun metodiikkaa. Turvallisuusperustelu luo perustan sidosryhmien väliselle vuoropuhelulle ja luotamuksen lisäämiselle ydinjätehuollon luvituksen edistämiseksi. Koska loppusijoitustilan olosuhteiden kehitys pitkällä aikavälillä on vaikeasti ennustettavaa, turvallisuuden arvioinnissa käytetään yleisesti skenaarioanalyysia, mutta tulosten tehokas hyödyntäminen turvallisuuden arvioinnissa on haastavaa. TURMET-projektin tavoitteena oli kehittää skenaarioanalyysia probabilistisen riskinarvioinnin menetelmillä, joissa epävarmuustekijät määritetään ja otetaan huomioon turvallisuuden arvioinnissa.

Tärkeimmät tulokset

Kirjallisuuskatsaukset – haasteiden ja kehityskohteiden tunnistaminen

Projektin ensimmäisenä vuonna tehtiin kaksi kirjallisuuskatsausta turvallisuusperustelun metodiikasta ja skenaarioanalyysistä. Näissä selvitettiin mm. miten skenaariot formuloidaan tyypillisesti joko tiettyinä oletuksina loppusijoitustilanteen kehityksestä (pluralistinen lähestymistapa) tai tapahtumina tulevaisuutta edustavassa todennäköisyysavaruudessa (todennäköisyyspohjainen tai probabilistinen lähestymistapa). Erityisiksi haasteiksi tunnistettiin mm. seuraavat:

- kattavuuden tai kokonaisvaltaisuuden (comprehensiveness) arviointi eli varmistuminen siitä, että skenaarioanalyysin tulokset antavat kattavia arvioita loppusijoitustodistuksen turvallisuudesta
- järjestelmällinen skenaarioiden luominen ominaisuuksien, tapahtumien ja prosessien (Features, Events and Processes, FEP) yhteisenä kehityksenä
- tietämyksen aukkojen (episteemisten epävarmuuksien) kvantifiointi esimerkiksi FEP-todennäköisyyksien kohdalla.

Skenaarioanalyysimalli

Näiden haasteiden ratkaisemiseksi kehitettiin todennäköisyyspohjainen malli skenaarioanalyysille, jossa loppusijoitustila on mallinnettu FEP:ien ja niiden vuoro-vaikutusten Bayesilaisena verkostona (kuva 4). Skenaariot ovat FEP:ien tilojen yhdistelmiä, joilla on ominaiset, toisistaan poikkeavat todennäköisyydet (perustuen simulaatioihin ja asiantuntijalausuntoihin). Loppusijoituslaitoksen riskiä arvioidaan tavoiterajan ylittymisen todennäköisyyden kautta, toisin sanoen sen todennäköisyyden perusteella, että turvallisuustavoite (esim. väestön annosnopeus) ylittää viranomaisen asettamat raja-arvot. Malli toteutettiin Matlab-koodina. Menetelmän pääpiirteet ja tieteelliset panokset kuvataan seuraavissa kappaleissa.

Kattavuus ja epävarmuus

Osa skenaarioanalyysia on epävarmuus loppusijoituslaitoksen riskistä. Kattavuutta voidaan pitää saavutettuna, jos jäljelle jäävä epävarmuus on riittävän pieni, jotta voidaan arvioida lopullisesti onko loppusijoituspaikka turvallinen vai ei. Jäljellä oleva epävarmuus johtuu tarkan tiedon puutteista (epistemisistä epävarmuustekijöistä) FEP-todennäköisyyksissä. Nämä epävarmuustekijät määritellään antamalla joukko mahdollisia todennäköisyyksiä Bayesilaisessa verkossa vastaavien riskien ala- ja ylärajojen arvioimiseksi. Riskirajojen välinen etäisyys on jäljelle jääneen epävarmuuden mittari. Kattavuutta voidaan siis arvioida vertaamalla näitä ylä- ja alarajoja ennalta määritettyyn turvallisuusrajaan. Tällöin kattavuus saavutetaan, jos molemmat rajat ovat raja-arvojen alapuolella tai yläpuolella, koska loppusijoituslaitos voidaan katsoa turvalliseksi (kuva 5a) tai ei turvalliseksi (kuva 5c). Toisaalta, kun rajat sisältävät riskirajan (kuva 5b), arviota turvallisuudesta ei ole perusteltua tehdä eikä kattavuutta saavuteta.

Riskien arviointi

Riskienhallinnan kannalta on hyödyllistä tunnistaa tärkeimmät skenaariot. Tätä varten projektissa sovellettiin riskienarviointimenetelmiä perinteisistä luotettavuus-analyyseista (esim. vikapuu) ydinjätteen loppusijoitukseen, jossa yksittäisten komponenttien (eli FEP:ien) vikaantumista ei ole määritetty. Projektissa tehtiin myös visualisointityökalu jonka avulla tulosten tulkitseminen ja käyttäminen on luontevampaa. Esimerkiksi *riskin toteutumisarvo* mittaa suhteellisen riskin suurenemisen jos tietty skenaario tapahtuisi, riippumatta sen todennäköisyydestä. *Osuus riskistä* taas riippuu sekä siitä että skenaario tapahtuu, kuin myös siitä että se tapahtuessaan aiheuttaa turvallisuusrajan ylityksen. Katsottaessa kuvan 4 *veden virtauksen ja hydraulisen johtavuuden* riskin toteutumisarvoa kuvassa 6 nähdään että skenaariolla 1 (suuri virtaus, matala johtavuus) on suurin arvo (260 %), mutta sen suhteellisen

pienen todennäköisyyden vuoksi osuus riskistä on vain 20 %. Yhteenvedona voidaan todeta että riskin toteutumisarvoon voidaan perustaa toimenpiteet tärkeimpien skenaarioiden ehkäisemiseksi ja loppusijoituslaitoksen riskin vähentämiseksi.

Dynaaminen skenaarioanalyysi

Jotta voidaan ottaa huomioda riskin ajallinen kehitys (joka on erityisen kiinnostava vuorovaikutusten tai riippuvuuksien esiintyessä FEP:ien välillä), on rakennettava dynaaminen Bayesilainen verkko mallintamalla FEP:it ja turvallisuustavoitteet useilla eri ajanhetkillä. Tämä edellyttää kuitenkin, että vuorovaikutukset mallinnetaan yksinkertaistetuilla tavoilla mallin sisältämien todennäköisyyksien määrän rajoittamiseksi sekä kognitiivisesti että laskennallisesti. Loppusijoituslaitoksen kehitystä voidaan simuloida Monte Carlo -laskennan avulla, jolloin ajasta riippuva riski voidaan arvioida laskemalla keskimäärin turvallisuus rajan ylitykset kaikkien iterointien yli.

Sovellus: mallin käyttö ydinjätehuollossa

TURMET-projektissa myös demonstroitiin malliin toimintaa oikean loppusijoituslaitoksen kohdalla. Tutkimus tehtiin yhteistyössä Belgialaisen SCK•CEN -tutkimuskeskuksen kanssa kattavuuden arvioimiseksi skenaarioanalyysissä paikallisen maaperäloppusijoituslaitoksen tapauksessa. Ensiksi käytettiin pluralistista lähestymistapaa muotoilemalla 13 skenaariota edustamaan mahdollisia kehityskulkuja. Yksittäisten skenaarioiden simulointi ei kuitenkaan mahdollista jäljelle jäävän epävarmuuden kvantifiointia ja kattavuuden arviointia.

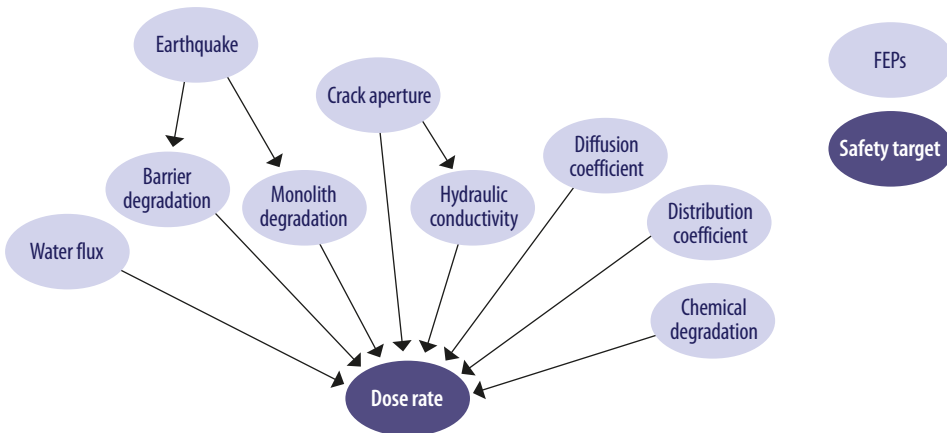
Analyysi toistettiin Bayesilaisen verkon avulla (kuva 4). Käytetyt FEP-todennäköisyydet saatiin 1000:n COMSOL Multiphysics-simulaation avulla ja alustavien asiantuntija-arvioiden perusteella. Intervallin viranomaisrajan ylittämisen todennäköisyydelle arvioitiin olevan 3,3 % – 85,6 %. Tuloksen tarkentamiseksi otettiin käyttöön Adaptive Bayesian Sampling (ABS) -algoritmi, jonka avulla voitiin optimoida FEP-tilojen yhdistelmien valinta. Tällä tavoin saatiin vähennettyä intervallin leveyttä (eli jäljelle jäävää epävarmuutta) 16,4 %. Lisäksi herkkyysoanalyysissä korostettiin, että *veden virtauksen* epävarmuustekijöiden pienentäminen vähentäisi edelleen jäljelle jäävää epävarmuutta 4 %.

Vaikka riskiraja (jonka turvallisuusviranomaiset päättävät) ei tässä ollut kiinnitetty, suuri jäljelle jäävä epävarmuus vastaa todennäköisesti kuvan 5b tilannetta, jossa kattavuutta ei saavuteta. Täten osoitettiin että toisin kuin pluralistisissa menetelmissä, uusi metodologia kuvaa riskiin liittyvää epävarmuutta. 1000 simulaatiota ei

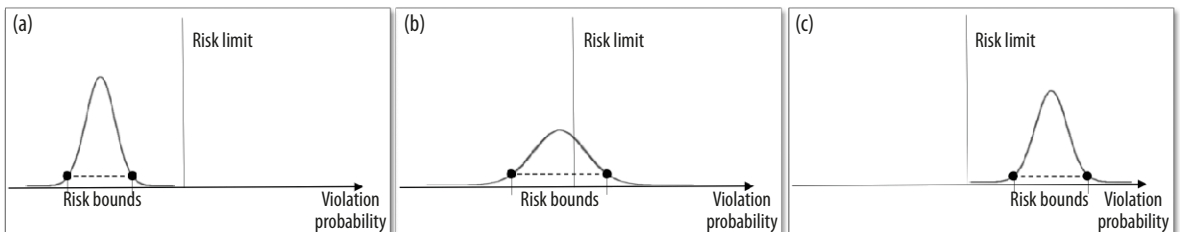
johtanut riittävään varmuuteen turvallisuudesta, joten voidaan olettaa että pluralistisen menetelmän huomattavasti pienempi määrä simulaatioita ei mahdollisesti riitä kattavuuden saavuttamiseen.

Johtopäätökset

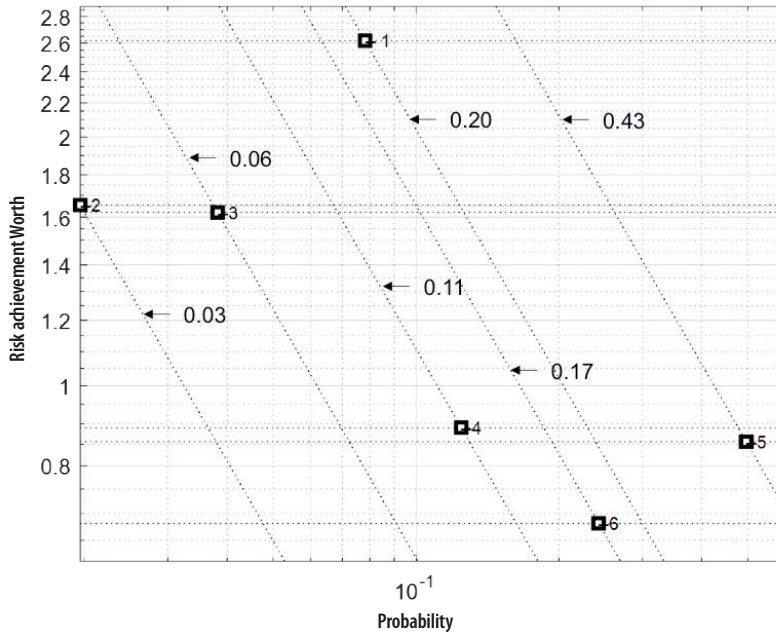
TURMET-projektissa kehitetty metodologia mahdollistaa kattavuuden arvioinnin skenaarioanalyysissä, tärkeimpien skenaarioiden tunnistamisen ja ajasta riippuvaiset analyysit. Tätä menetelmää sovellettiin esimerkkitapaukseen Belgialaiseen maa-peräloppusijoituslaitokseen liittyen, tavoitteena kattavuuden arviointi. Metodologia soveltuu myös laajemman mittakaavan (kuten syvän geologisen loppusijoituslaitoksen) mallintamiseen. Projektissa osoitettiin, että jäljelle jäävän epävarmuuden kvantifiointi on olennaista sen arvioimiseksi, onko kattavuus saavutettu. Erityisesti osoitettiin, että pluralistiset lähestymistavat, jotka perustuvat rajoitettuun määrään valittuja skenaarioita skenaarioon, ovat haastavia kattavuuden saavuttamisen näkökulmasta.



Kuva 4. Bayesilainen verkko kuvaa ydinjätteen loppusijoituslaitosta.



Kuva 5. Vertailu riskin intervaleista suhteessa riskin rajaan kattavuuden arvioinnin kannalta.



Kuva 6. Skenaariot (neliöt) *veden virtaus ja hydraulinen johtavuus* kuvassa 4, järjestettyinä riskin toteutumisarvon (pysty akseli) ja riskin osuuden kannalta (diagonaaliset suorat).

6.3 Puskuri- ja täyteaineiden toimintakyky

6.3.1 Koordinoitu hanke – THEBES – THMC Behaviour of the Swelling Clay Barriers – Paisuvien savipuskurien THMC käyttäytyminen (Hankkeet 6–9)

Wojciech Solowski, Ayman Abed, Aalto-yliopisto

Veli-Matti Pulkkanen, Michal Matuszewicz, Joonas Järvinen, Markus Olin, Ville Sjöblom, VTT

Markku Kataja, Tero Harjupatana, Jyväskylän yliopisto

Kai Hiltunen, Mika Laitinen, Janne Martikainen, Antti Niemistö, Numerola Oy

THEBES-konsortio koostuu kahdesta yliopistosta, Aalto-yliopistosta (koordinaattori) ja Jyväskylän yliopistosta, sekä Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:stä ja Numerola Oy:stä. Konsortion osaaminen ulottuu bentoniitin mikrorakenteen kokeellisesta tutkimuksesta kemiallisiin analyysiin ja bentoniitin numeeriseen

mallinnukseen. THEBES-konsortion tutkimus KYT2018 kaudella kattoi kaikki nämä aihealueet ja osaamista käytettiin luomaan aiheista uutta tietämystä.

1. Tutkimusaiheet ja keskeisimmät tulokset

Tutkimuksen tavoitteena oli kehittää ymmärrystä bentoniitin käyttäytymisestä ja yhdistämällä konsortion osapuolten osaamista saavuttaa uutta näkemystä bentoniitin käyttäytymisestä mikro- ja makroskooppisissa mittakaavoissa. Näkemys yhdistettynä tuotettuun kokeelliseen dataan toimi kulmakivenä luoduille numeerisille malleille, joita puolestaan voidaan hyödyntää tulevaisuudessa ydinjätteen loppusijoituksessa käytettävien savikomponenttien käyttäytymisen simuloimiseen ja ennustamiseen.

Pienimmässä mittakaavassa VTT analysoi montmorilloniittihiutaleiden (platelet) koko- ja muotojakauksen näytteistä, jotka saatiin Geobiokierto-projektilta (KYT2018). Näytteissä ei havaittu merkittävässä määrin montmorilloniitin muuntumista kolmivuotisten kokeiden aikana. VTT tutki myös kompaktoidun bentoniitin kemiallista evoluutiota suoraan näytteeseen asennettavilla elektrodeilla (pH, Cl and Na), mistä saatiin kokeellista dataa. Tutkimusten tulokset ovat saatavilla seuraavista julkaisuista: (2016a²⁰,b²¹), Matusewicz & Olin (2018), Matusewicz (2018), Järvinen *et al.*(2019?)²².

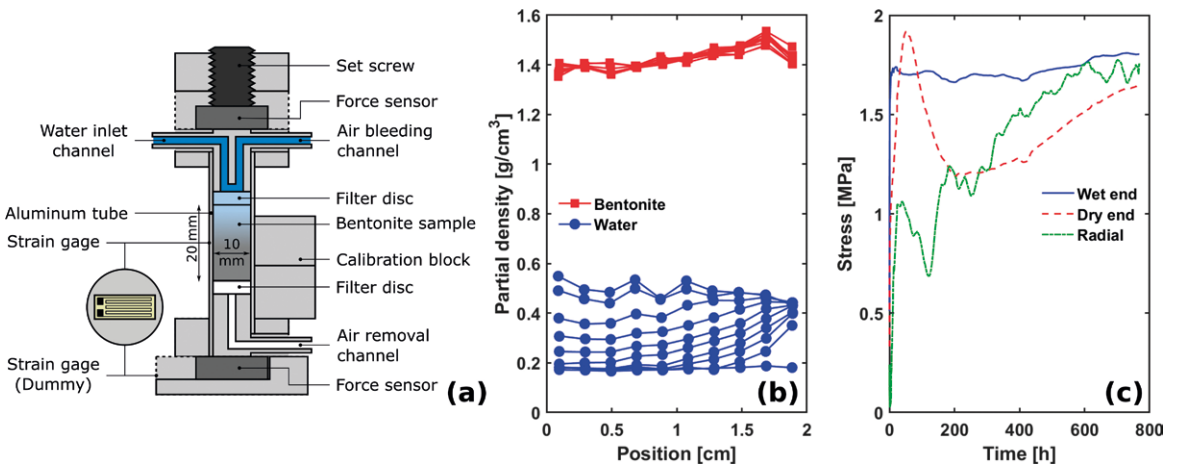
Laboratorio-mittakaavassa Jyväskylän yliopisto käytti röntgen-tomografiaa ja -kuvaamista MX-80 bentoniitin käyttäytymisen monitorointiin kastumisen aikana. Ensimmäinen koesarjasta saatiin dataa vakiotilavuudessa pidettävien näytteiden vesipitoisuuksista ja siirtymäkentästä neljässä ulottuvuudessa, 4D, (3 avaruudellista ulottuvuutta ja aika) sekä paisuntajännityksestä näytteiden molemmissa päissä. Toisessa koesarjassa tutkittiin bentoniitin vapaata paisumista, kun sitä kasteltiin 0.1 M NaCl vesiliuoksella. Mittaukset tehtiin 4D:ssä 16 näytteelle, jotka kattavat kolmen alkukuivatiheyden ($\rho_{b0} = 1.40 \text{ g/cm}^3$, 1.65 g/cm^3 ja 1.90 g/cm^3) ja vesipitoisuuden ($w_0 = 12 \%$, 17% ja 24%) kombinaatiot sekä kaksoisnäytteet. Vapaan paisumisen salliminen johtaa suuriin muodonmuutoksiin ja huomattaviin vesipitoisuuksien muutoksiin, joten saatujen kokeellisten tulosten toisintaminen mallintamalla

²⁰ Julkaisu liittyy myös aikaisempaan KYT2014 ohjelman projektiin BOA.

²¹ Julkaisu liittyy myös EC BELBaR projektiin.

²² Hankkeen toistaiseksi julkaisemattomat viitteet on tässä varustettu kysymysmerkillä; ne listataan hanketiivistelmän lopussa.

voi olla vaikeaa. Näin ollen kokeellisia tulosten erot voivat olla suuret eri materiaali- ja kulkeutumismalleilla saataviin simulointituloksiin nähden. Kolmannessa koe-sarjassa mitattiin bentoniitin kastumista ja turpoamista vakiotilavuudessa samalla koejärjestelyllä, jota käytettiin vapaan paisunnan kastumiskokeissa. Sarjassa mitattiin 12 näytettä eri alkukuivatiheyksillä ja -vesipitoisuuksilla (kahdesti) ja esimerkki tuloksista esitetään kuvassa 7.



Kuva 7. Poikkileikkauskaaviokuva näytteenpitimestä, jota käytettiin vakiotilavuudessa pidettävien näytteiden mittaamiseen poikkileikkauksesta (a). Esimerkkiaikasarja mitatuista bentoniitin ja veden osastiheyksistä ($t = 0, 2 \text{ h}, 6 \text{ h}, 12 \text{ h}, 1 \text{ d}, 2 \text{ d}, 4 \text{ d}, 8 \text{ d}, 16 \text{ d}, 32 \text{ d}$) (b) ja jännityksistä (c).

Tulokset on koottu datapankkiin (väliaikainen linkki http://users.jyu.fi/~hpatana/bentonite_databank/) ja niitä esitetään seuraavissa julkaisuissa: (Harjupatana *et al.* 2015²³), Harjupatana *et al.* (2019a?, 2019b?) ja Abed *et al.* (2016).

Aalto-yliopisto suoritti MX-80 bentoniitilla lisätutkimuksia, joissa selvitettiin sen veden imukykyä (retention behaviour). Vedenpidätyskäyrät (water retention curve) mitattiin aluksi tislattulla vedellä käyttäen imupaperimenetelmää ja WP4 jäähdytettyä peili-kastepiste-tyyppistä suhteellisen kosteuden mittaria (chilled-mirror dew-point psychrometer). Onnistuneen kirjallisuusdataan nähden tehdyn vertailun

²³ Julkaisu liittyy myös KYT2014 ohjelmassa tehtyyn työhön.

jälkeen Aalto mittasi vedenpidätyskäyrät NaCl 1M, 2M ja 4M liuoksille ja Olkiluodon pohjavesisimulanteille, jotka valmisti VTT. Tulokset on julkaistu (Kuusela-Lahtinen *et al.* 2016, Yang *et al.* 2018²⁴) ja vielä yksi artikkeli on valmisteilla (Yang *et al.*, 2019?).

Lisäksi VTT on asentanut laitteistoja ja kehittänyt toimintatapoja bentoniitin mekaanisten ominaisuuksien selvittämiseksi makroskooppisella tasolla eri olosuhteissa. Laitteistot sisältävät korkean paineen triaksiaalikammion, siihen sopivan kuormituskehän, yksiaksiaalisia kammioita ja laitteistoja näytteenvalmistusta varten. Niiden käyttötapojen kehittäminen on ollut keskeisessä roolissa projektissa. Ensimmäisiä tuloksia on saatu, mutta ennen kaikkea on luotu kyky käyttää uusia laitteistoja ja menetelmiä.

Kokeellisesta toiminnasta saatuun näkemykseen perustuen (etenkin Jyväskylän yliopiston ja Aallon kokeista ja kirjallisuudesta) kaikki konsortion osapuolet ovat toisintaneet mallintamalla kokeellisesti havaittua bentoniitin käyttäytymistä. Pulkkanen VTT:ltä on kirjoittanut väitöskirjan kehittämästään suurten muodonmuutosten mallista kemoelastisille huokoisille materiaaleille (eli bentoniitille) (Pulkkanen 2019?). Muut konsortion osapuolet ovat käyttäneet bentoniitin käyttäytymisen mallinnukseen *Numerin*-ohjelmistoympäristöä (korkean tason mallinnusohjelmisto, jota kehittää ja ylläpitää Numerola). *Numerin* on erittäin joustava mallinnusympäristö, jota voi käyttää THMC-analyyseihin, joita tarvitaan bentoniitista tehtyjen vapautumisesteiden käyttäytymisen simulointiin loppusijoitusympäristössä. Lisäksi Numerola on yhteistyössä Jyväskylän yliopiston kanssa implementoinut Markku Katajan kehittämän hydromekaanisen konstitutiivisen mallin *Numerin*-ympäristöön. Tämä elastoplastinen malli kuvaa bentoniitin jännityksen riippuvuutta venymästä ja vesipitoisuudesta, minkä seurauksena esimerkiksi paisuntajännityksen kehittymistä voidaan arvioida bentoniitin kastuessa. Mallin kehitys on jatkumoa aikaisemmin KYT2014-ohjelmassa tehdyille työlle. Nykyinen mallinkehitysvaihe on todennettu käyttämällä Jyväskylän yliopiston tekemiä kokeita.

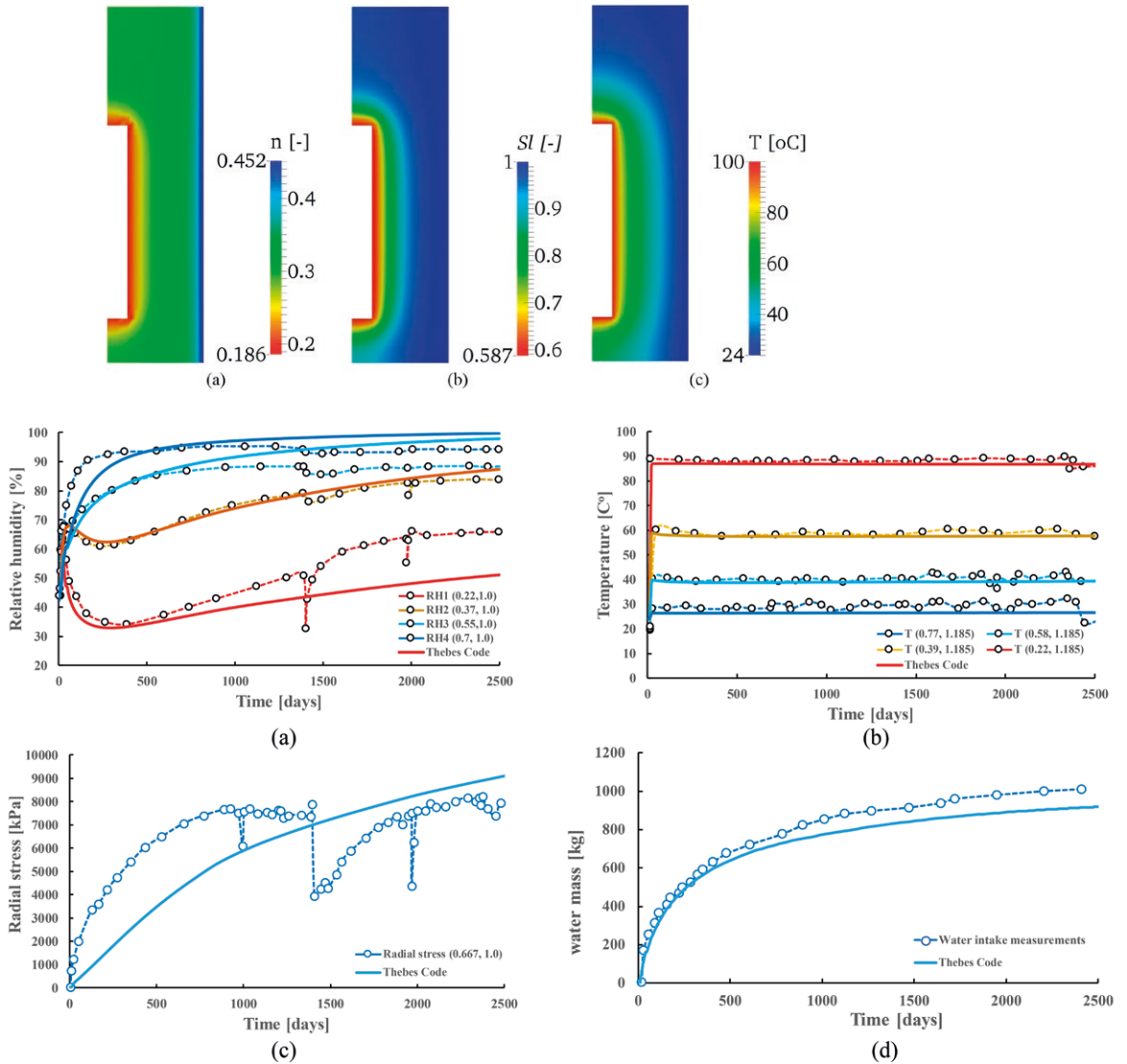
Aalto-yliopisto on kehittänyt *Numerin*-ohjelmistoympäristöön merkittäviä ominaisuuksia, jotka mahdollistavat THMC-kytkettyjen simulointien suorittamisen bentoniitille. Tärkeimmät kehitetyt piirteet sisältävät: (i) Extended Barcelona Basic Model sisältäen lämmön vaikutuksen mekaaniseen käyttäytymiseen ja modifiointeja elastiseen käyttäytymiseen, (ii) nestemäisen veden kulkeutuminen perustuen

²⁴ Julkaisussa kiitetään KYT2018 THEBES projektia (Sołowski) ja Chinese Research Council- rahoitusta (Yang).

laajennettuun ja kytkettyyn Darcy-formulointiin osittain saturoituneille huokoisille materiaaleille sisältäen mekaanisten muodonmuutosten vaikutukset, lämpötilan vaikutuksen veden tiheyteen ja viskositeettiin, vedenpidätyiskäyttäytymisen, suolan vaikutuksen veden tiheyteen ja huokoisuuden muutoksen vaikutuksen vedenjohtavuuteen, (iii) vesihöyryn virtaus perustuen Philip & De Vries-teoriaan, (iv) kaasun virtaus perustuen Darcy-virtaukseen, joka on kytketty saturaatioon ja huokoisuuden muutoksiin, (v) termodynaamisesti konsistenssi energiatase sisältäen lämmön virtauksen ja faasimuutoksiin liittyvän energian kuin myös lämmön virtauksen kytkennän mekaaniseen muodonmuutokseen sekä veden kaasun virtaukseen, (vi) suolan kulkeutumisen perustuen Fickin lakiin ja "compositional"-menetelmään. Jokainen piirre on huolellisesti verifioitu sisältäen esimerkiksi ratkaisun melko vaikeaksi tunnettuun Elder-ongelmaan (Abed & Sołowski 2017, 2018, 2019a?,b?, Abed *et al.* 2016, 2018). Aalto käytti kehitettyä THMC mallikehystä lukuisien loppusijoitukselle tärkeiden kokeiden toisintamiseen. Aallon simuloinneissa käytettiin kokeista saatua veden pidätymisdataa. Aalto myös toisti simuloinnein Jyväskylän yliopiston kokeita (Abed & Sołowski 2017), suuren mittakaavan puskurimateriaalitestin (CIEMAT mock-up experiment, Abed & Sołowski 2019c?, ks. myös kuva 8) ja laboratoriomittakaavan bentoniitilohko-pellettikokeen (Abed & Sołowski, 2019d?). Lohko-pellettikoe on erityisen mielenkiintoinen Posivalle, jolta laboratorio-kokeiden data saatiin. Tämä vahvistaa teollisuuden ja THEBESin sekä ydinjätteen tutkimuksesta kiinnostuneiden välistä yhteistyötä.

THEBESissä tuotettuun ja myös kirjallisuusdataan perustuen Aalto kehitti myös uuden mallin, jolla voi ennustaa tarkasti veden pidätyiskäyttäytymistä materiaaleille, joiden montorilloniittipitoisuus on korkea. Mallin perustuu saven mineralogiseen koostumukseen ja mikrorakennedataan (esim. elohopea-intruusio porosimetri) ja se on ensimmäinen malli, joka käyttää näitä ominaisuuksia savi-materiaalien veden pidätyiskäyttäytymisen ennustamiseen (Abed & Sołowski 2018, Abed & Sołowski 2019a?,b?)

Aallon tutkimuksen lopputulema on kansainvälisen tason THMC mallikehys, jota voidaan käyttää korkean bentoniittipitoisuuden materiaaleille, joissa tapahtuu THMC prosesseja, kuten ydinjätteen geologisissa loppusijoitustiloissa.



Kuva 8. Aallon simuloima CIEMATin koe. Huokoisuuden, saturaation, ja lämpötilan kehittyminen (ylin kuva) ja suhteellisen kosteuden, lämpötilan, paisuntapaineen ja huokoisten ylipaineen kehittyminen (alemmat 4 kuvaajaa).

Konsortio järjesti vuosittain bentoniitti-aiheisen avoimen seminaarin, joissa esiintyi kutsuttuja esitelmöitsijöitä. Seminaarit mahdollistivat keskustelun tutkimusideoista. Seminaareihin osallistui alan teollisuuden ja viranomaisten edustajia, mikä auttoi osaamisen vaihtoa THEBESin ja suomalaisten paisuvien bentoniittisavisten

vapautumisesteistä kiinnostuneiden avainorganisaatioiden välillä. Konsortio ylläpitää myös internet-sivustoa, jolla on julkaistu viimeisimpiä THEBES-uutisia ja jolta konsortion yhteystiedot ovat helposti saatavilla.

2. Tulosten merkitys ydinjätetutkimukselle erityisesti käytettävyyden ja muun tutkimuksen näkökulmasta

THEBES-konsortio tutki bentoniitin käyttäytymistä monella tapaa ja tunnisti siitä oleellisia piirteitä. Tuloksia käytettiin mallien luomiseen. Malleissa otettiin huomioon osittain tai kattavasti prosessit, joihin vaikuttavat lämpötila, huokosvesikemia, ulkoiset mekaaniset tekijät, minerologia ja vesipitoisuus. Kokeellisia tuloksia voi käyttää myös suoraan numeeristen bentoniittimallien todentamiseen. Mallit ovat puolestaan oleellisia ydinjätteen loppusijoituksessa käytettävien savi-komponenttien toimintakyvyn ja turvallisuuden arvioimiseksi.

VTT suoritti mikrorakennetutkimuksia ja teki havaintoja mikrobien vaikutuksesta montmorilloniittiin useissa olosuhteissa. VTT teki bentoniitilla myös kemiallisia kokeita perustuen kehittämiinsä suoraan näytteeseen asennettaviin kemian muutoksia mittaaviin elektrodeihin. Jälkimmäisen ovat merkityksellisiä etenkin bentoniitin kemiallisen käyttäytymisen määrittämiseksi hapettomissa olosuhteissa. Röntgentomografiaan ja -kuvaukseen perustuvat Jyväskylän yliopiston kokeet tuottivat arvokasta aikasarjadataa liittyen veden kulkeutumiseen ja bentoniitin paisumiseen bentoniittinäytteissä. Tällaista dataa ei ole helposti saatavilla ja se mahdollistaa paremman bentoniittimallien validoinnin, joka on tärkeää, sillä bentoniitin käyttäytymisen ennustamiseen ydinjätteen loppusijoituksessa käytettävien mallien tulee olla mahdollisimman tarkkoja.

Aallon tuottama kokeellinen osittain saturoituneen bentoniitin vedenpidättymisdata on arvokasta sellaisten mallien validointiin, jotka ottavat huomioon kemian vaikutuksen bentoniitin käyttäytymiseen. Koska veden pidättäminen on perustavanlaatuisen osittain saturoituneen bentoniitin ominaisuus ja koska se on suoraan kytketty mikrorakenteeseen (Abed & Sołowski, 2019a?), data voidaan käyttää kemiallisesti kytketyn mallinnuksen lisäksi suoraan arviointeihin suolaisuuden vaikutuksesta bentoniitin mikrorakenteeseen. Tämä tuo uuden näkökulman mikroskooppisiin menetelmiin, kuten molekyyldynamiikkaan. On myös selvää, että kemiallisen kytkennän merkitys bentoniitin käyttäytymiselle on niin suuri, että sitä ei voi jättää pois mallinnuksesta, vaikka kytkentää ei vielä täysin ymmärretäkään. Tutkimuksessa testattiin myös Olkiluodon vesisimulanttien

vedenpidätyksikäyttäytymistä. Saatuja tuloksia voidaan käyttää suoraan rakennettavien loppusijoitustilojen mallinnuksessa.

THEBESissä suoritettu numeerinen mallinnus tutki erilaisia lähestymistapoja bentoniitin käyttäytymisen ennustamiseen numeerisesti. VTT käytti elastokemiallista lähestymistapaa (Pulkkane 2019?, esitarkastuksessa), kun taas Numerola, Jyväskylän yliopiston ja Aalto kehittivät elastoplastista mallikehystä. Jyväskylä yliopiston ja Numerolan yhdessä kehittämä malli hyödynsi suoraan Jyväskylän yliopiston kokeellisia tuloksia mallin suunnitteluun ja kalibrointiin. Tämä tarkoittaa, että lisätodentamista tarvitaan, jotta luottamus malliin on tarpeeksi korkea sen käyttämiseen loppusijoitustilan suunnitteluun, vaikka onnistuessaan se olisi merkittävä kehitysaskel.

Aalto käytti erilaista lähestymistapaa ja rakensi täysin kytketyn THMC mallikehyksen, jolla lähestytään mallinnusta samaan tapaan kuin olemassa olevissa mallikehyksissä (kuten CODE_BRIGHTissa). Tuotettu mallikehys on numeerisesti robusti osittain *Numerin*-ratkaisimen hyvästä suunnittelusta johtuen, mutta robustisuus on seurausta myös nykyaikaisesta ohjelmoinnista ja opeista, jotka on saatu olemassa olevien mallikehysten kehittämisestä. Tämä elementtimenetelmä-mallikehys (Abed & Sołowski 2017, 2019c?) yhdistää uudella tapaa olemassa olevia malleja ja myös uusia malleja (Abed & Sołowski 2019a,b?). Se on läpikotaisin verifioitu ja validoitu simuloimalla monia ydinjätteen loppusijoitukselle oleellisia ongelmia. Näin ollen tätä numeerista työkalua voidaan käyttää suoraan ydinjätteen loppusijoitukseen liittyvien mallinnusongelmien simuloimiseen (Abed & Sołowski, 2019b,c?). Tutkimuksessa ilmeni myös puutteita, joita tutkitaan tulevaisuudessa, ja joitain materiaaliominaisuuksia, jotka tulee ottaa huomioon entistä tarkemmin.

THEBES-konsortio teki yhteistyötä monien kansainvälisten maineikkaiden tutkimuskumppanien kanssa. Tutkimuskumppaneilla on syvällistä kokemusta bentoniittipitoisten savien ja niiden käytöstä ydinjätteen loppusijoituksessa. Yhteistyön tuloksena saatiin yhteisjulkaisuja (Abed et al. 2016, Kuusela-Lahtinen et al. 2016), seminaareja ja esityksiä mm. seuraavissa yliopistoissa: Université de Pau et des Pays de l'Adour (2015), Politecnico di Milano (2017) and Imperial College (tammikuu 2019, suunniteltu). THEBES isännöi myös monia kansainvälisiä esiintyjiä vuosittaisissa tapahtumissa ja seminaareissa: Kröhn (GRS), Delage (Ecole des Ponts ParisTech), Villar (CIEMAT) and Mendes (Northumbria University). Vuosittaiset avoimet seminaarit mahdollistivat myös tutkijoiden ja alan teollisuuden ja viranomaisten välisen vuorovaikutuksen.

THEBES myötävaikutti kolmen pro gradun (tai diplomityön) ja yhden väitöskirjan julkaisuun. Lisäksi yksi väitöskirja on esitarkastuksessa.

Yleisesti ottaen THEBES-konsortion tutkimus kytkeytyy muihin konsortion osapuolten tutkimuksiin (esim. EC Euratom-projekteihin), yhteistyöhön suomalaisten ja kansainvälisten ydinjätteiden loppusijoituksen turvallisuudesta ja suunnittelusta kiinnostuneiden osapuolten kesken ja myös laajempaan tutkimusyhteisöön.

3. Käytetyt tutkimusmenetelmät

THEBES konsortio käytti tutkimuksissaan päteviä ja luotettavia tutkimusmenetelmiä, mikä on osoitettu lukuisilla vertaisarvioituilla tieteellisillä julkaisuilla liitteessä 2. Asiasta kiinnostuneet lukija voivat tutustua menetelmien yksityiskohtiin julkaisujen avulla.

4. Julkaisemattomat viitteet

Abed AA & Sołowski WT (2019a?, after second review) Estimation of water retention behaviour of bentonite based on mineralogy and mercury intrusion porosimetry tests. Geotechnique, (second round of review).

Abed AA & Sołowski WT (2019b?, in review) Numerical implementation and validation of a microstructure-based procedure to estimate the water retention curve for granular materials. International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, under review.

Abed, AA & Sołowski, WT (2019c?, accepted) Applications of a New THMC Coupled Code "Thebes". Accepted for publication in Environmental Geotechnics.

T. Harjupatana, J. Alaraudanjoki and M. Kataja (2019a?, in prep) A method for measuring wetting and swelling of bentonite in a narrow channel using X-ray imaging.

T. Harjupatana and M. Kataja (2019b?, in prep) One-dimensional free swelling and constant volume wetting of MX80 bentonite measured by X-ray imaging.

Järvinen, J. et al. (2019?, in prep.) Diffusion of pH in compacted bentonite under an-aerobic conditions

Matusiewicz, M., Olin, M. (2018?, accepted). Comparison of microstructural features of three compacted and water saturated swelling clays: MX-80 bentonite, and Na- and Ca- montmorillonites, Clay Minerals

Yang, X, Sołowski, WT, Matusiewicz M (2019?, in prep.), Experimental Study on Effects of Saline Solutions on Soil-Water Characteristic Curves of MX-80 Bentonite.

Abed, AA & Solowski, WT (2019d?, submitted), Simulation of swelling pressure evolution during infiltration in a bentonite block-pellet laboratory scale test. 7th Asia-Pacific Conference on Unsaturated Soils, Nagoya, Japan.

Veli-Matti Pulkkanen (2019?, in pre-examination), A large deformation model for chemoelastic porous media – bentonite clay in spent nuclear fuel disposal. Dr. (Tech.) Thesis. Aalto University.

6.3.2 Bentoniitin eroosio ja radionuklidien vuorovaikutus – BENTO (Hanke 10)

Pirkko Hölttä, Outi Elo, Valtteri Suorsa, Eini Puhakka, HYRL

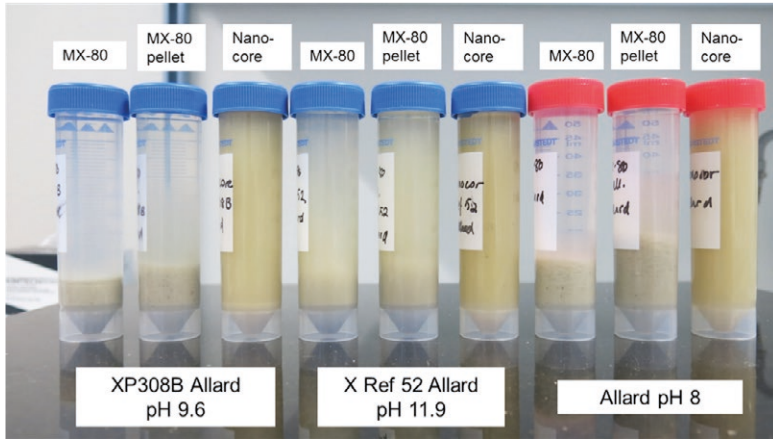
Bentoniitin kemiallisen eroosion seurauksena puskurin massaa häviää mikä voi vaikuttaa heikentävästi puskurin ominaisuuksiin suojata kanisteria ja hidastaa radionuklidien kulkeutumista pois lähialueelta. Bentoniitista muodostuneet stabiilit ja mobiilit savipartikkelit eli kolloidit pidättävät radionuklideja ja voivat toimia niiden kuljettajina kallioperässä. Hankkeen tavoitteena oli tutkia kokeellisesti bentoniitin massan hävikkiä aiheuttavaa eroosiota ja sen seurauksena muodostuneiden bentoniittikolloidien, radionuklidien ja mineraalien välisiä vuorovaikutuksia loppusijoitus-tilaa mahdollisimman hyvin kuvaavissa olosuhteissa.

”Bentoniitin eroosio” osaprojektissa tutkittiin bentoniitin eroosiota ja siitä irtautuvien kolloidien muodostumista ja stabiiliutta määrittämällä kolloidien partikkelikokojakaumia, pitoisuuksia ja zeta potentiaaleja käyttäen dynaamista laservalon-sironta- ja ICP-MS menetelmiä. Veden ionivahvuus ja liuoksen kationit olivat

tärkeimmät tutkittujen MX-80 bentoniitin ja Nanocor PGN montmorilloniitin eroosioon ja kolloidien stabiiliuteen vaikuttavat tekijät (kuva 9). Kahdeksan vuoden ajan seuratuissa näytteiden laimeissa liuoksissa ($I = 0.001\text{--}0.01\text{ M}$) kolloidien partikkelikokojakauma oli kapea ja koko pysyi alle 500 nm ja stabiiliutta kuvaava zeta potentiaali alle -30 mV. Veden suolaisuuden lisääntyessä kolloidit aggregoituvat suuremmiksi partikkeleiksi ja sedimentoituvat pois liuoksesta. Kahden arvoisen kalsiumin ionien läsnä ollessa bentoniitti kolloidit olivat suurempia ja vähemmän stabiileja kuin yhden arvoisen natriumin ollessa. Alun jyrkän kolloidien konsentraation nousun jälkeen saavutettiin taso, jossa eroosio hidastui ja loppuu lähes kokonaan. Emäksinen sementtivesi (pH 9, pH 12) lisäsi bentoniitin eroosiota ja kolloidien stabiiliutta (kuva 10). Montmorilloniitin osuus vaikutti myös selvästi eroosioon, Nanocor PGN montmorilloniitilla (98 %) eroosio oli voimakkaampaa kuin MX-80 bentoniitilla (76 % montmorilloniittia).

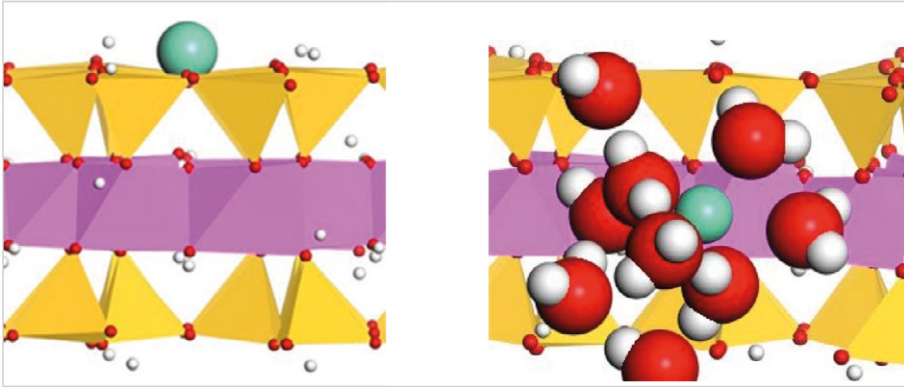


Kuva 9. Nanocor PGN montmorilloniitin eroosio eri ionivahvuuden omaavissa referenssi pohjavesissä ja elektrolyyteissä. Vasemmalta oikealle: Allard (4.2 mM), Olso (0.517 M), Olso (5 mM), Olso (1 mM), NaCl (1 mM) and CaCl₂ (1 mM).



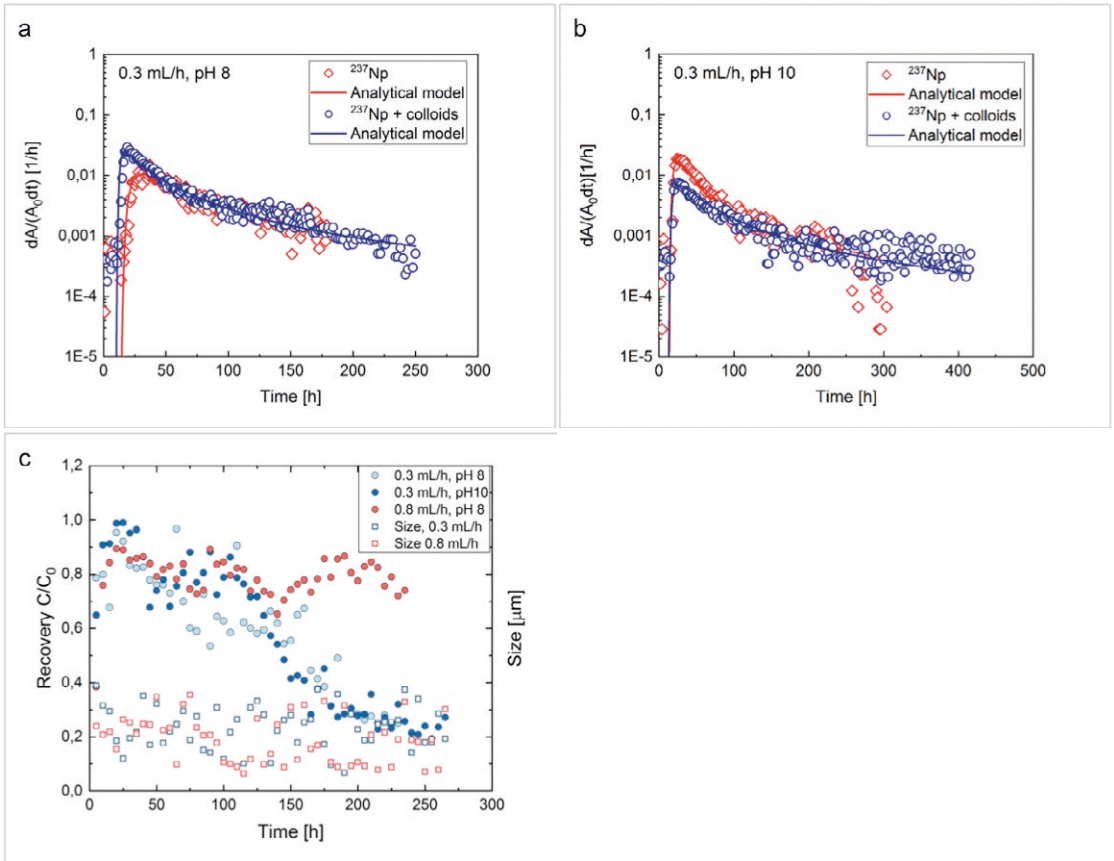
Kuva 10. MX-80 bentoniitin ja Nanocor PGN montmorilloniitin eroosio sementtivedessä.

”Radionuklidien vuorovaikutus” osaprojektissa tutkittiin ravistelukokeilla radionuklidien (^{85}Sr , ^{134}Cs , ^{152}Eu , ^{237}Np) sorptiota/desorptiota kahteen bentoniittiin ja niiden kolloideihin sekä kolonnikokeilla kolloidien vaikutusta radionuklidien kulkeutumiseen. Ravistelukokeiden tuloksena saatiin radionuklideille jakaantumiskertoimia (K_d) pH, ionivahvuuden, merkkiaineen konsentraation ja ajan funktiona. Desorptiokokeilla saatiin selvitettyä kuinka pysyvästi radionukklidi on kiinnittynyt mineraaliin. Kolloideihin tapahtuvaan sorptioon vaikutti myös veden ionivahvuus, jonka kasvaessa sorptio väheni aggregoituneiden partikkelien ominaispinta-alan kasvaessa. MX-80 bentoniitti pidatti radionuklideja voimakkaammin kuin montmorilloniitin pitoisuudeltaan Nanocor PGN. Radionuklidien sorptiota tulkittiin molekyyllitason mallinnuksen avulla, jolla saatiin tietoa kationin pidättymismekanismeista. Cs^+ ja Sr^{2+} kiinnittyvät kationinvaihdolla montmorilloniitin 2:1 rakenteen tasopinnalle kun taas $\text{Eu}(\text{H}_2\text{O})_9^{3+}$ kiinnittyy rakenteen leikkauspinnalle (kuva 11), jolloin sen sorptioenergia on suurempi kuin tasopinnalle kiinnittyneillä. Neptuniumin ja mineraalien välisen montmorilloniitin päätyypintaan kiinnittynyt sisäkompleksi tunnistettiin soveltaen spektroskooppisia menetelmiä: In-situ ATR FT-IR and EXAFS yhteistyössä HZDR:n (Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf) kanssa.



Kuva 11. Vasemmalla Cs^+ ja Sr^{2+} kiinnittyminen montmorillonitiin tetraedisen kerroksen tasopintaan. Oikealla $\text{Eu}(\text{H}_2\text{O})_9^{3+}$ kompleksin kiinnittyminen oktaedrisen kerroksen leikkauspinnalle. Pii (keltainen), alumiini (pinkki), natrium (violetti), happi (punainen), vety (valkoinen), Cs/Sr/Eu (turkoosi).

MX-80 bentoniittikolloidien vaikutusta ^{237}Np :n kulkeutumiseen tutkittiin Kurun Grey graniitti murske- ja kairansydänkolonneilla käyttäen 10 mM natriumperkloraaattia (pH 8 ja pH 10) ja virtausnopeuksia 0.8 ml/h ja 0.3 ml/h. Läpitulokäyrät mallinnettiin käyttämällä advektio-matriisidiffusioyhtälön analyttistä ratkaisua. Läpitulokäyrissä havaittiin lievä kolloidien vaikutus, mikä tarkoittaa, että kolloideihin kiinnittynyt Np eluoitui kolonnista pH-arvossa 8 nopeammin kuin Np, jonka eluoituminen hidastui pidättymisellä graniittipinnoilla (kuva 12). 0.3 ml/h kokeessa pH-arvossa 10, kolloidien jäädessä virtauskanaviin aiheutti kolloideihin kiinnittyneen neptuniumin kulkeutumisen hidastuminen, joka vahvistui määrittämällä kolloidien saannot kolonnikokeissa eri virtauksilla (kuva 12).



Kuva 12. Np(V):n mitatut ja mallitetut kairansydänkolonnikokeiden läpitulokäyrät, virtausnopeus 0.3 mL/h, pH 8 (a) ja 10 (b) ilman kolloideja (punaiset symbolit) ja kolloidien läsnäollessa (siniset symbolit). Kolonnikokeissa mitattu kolloidien saanto ja keskimääräinen partikkelikoko (c).

Kuru Grey graniittiblokin luonnonraon soveltuvuutta testattiin kolloidien ja radionuklidien kulkeutumiskokeita varten rinnakkaisilla virtauskokeilla merkkiaineina HTO, ^{36}Cl and fluoresoiva Amino-G. Toistettavien ja samankaltaisten läpitulokäyrien perusteella blokkia voitaisiin jatkossa käyttää tutkittaessa bentoniittikolloidien vaikutusta radionuklidien kulkeutumiseen. Ravistelukokeilla selvitettiin ^{152}Eu :n jakaantumista graniittimurskeen ja Ni leimattujen montmorilloniitti kolloideihin välillä kilpailutilanteessa, jossa molempia oli liuoksessa läsnä. Aluksi ^{152}Eu oli kiinnittynyt lähes 100 % kolloideihin mutta noin 10 päivän jälkeen se oli jakaantunut melko tasan kolloideihin ja kivimurskeen välillä. Alustavassa kokeessa ^{152}Eu :n ja kolloidien läpituloa ei havaittu

kahden kuukauden aikana osan europiumista kiinnittyessä raon mineraalipintoihin ja mahdollisena syynä käytetty hidas virtausnopeus, jolloin kolloidit ovat jääneet raon koloihin ja epätasaisiin pintoihin. Pienten kolloidipitoisuuksien määrittäisiin sovellettiin LIBD (Laser Induced Breakdown Detection) menetelmää Karlsruhessa (KIT) Saksassa.

KYT2018 tutkimuskauden aikana saatiin runsaasti uutta kokeellista dataa bentoniitin eroosiosta ja radionuklidien sorptiosta. Hankkeen aikana kehitettiin ja käytettiin eri koejärjestelyitä ja sovellettiin edistyneitä analyysimenetelmiä. Tulosten perusteella tiedetään veden suolapitoisuuden olevan tärkein bentoniitin eroosioon ja sen seurauksena syntyvien kolloidien stabiilisuuteen. Tärkein radionuklidien kemialliseen muotoon ja siten niiden sorptioon vaikuttava tekijä on pH. Spektroskooppisilla menetelmillä ja molekyylihallituksen avulla saatiin tärkeää tietoa radionuklidien sorptiomekanismeista. Kolonnikokeilla osoitettiin kolloidien edistävä vaikutus radionuklidien kulkeutumiseen. Tuloksia on hyödynnetty myös EU/BELBar ja Grimse-lin CFM projekteissa. Työssä yhdistettiin kokeellinen työ ja mallinnus. Lisäksi kehitettiin kotimaista osaamista sekä koulutettiin radiokemian, erityisesti loppusijoituksen alalle uusia asiantuntijoita. Turvallisuusperustelujen kannalta relevanttien kokeiden tuloksia voidaan mahdollisesti tulevaisuudessa käyttää parametreina mallien kehittämisessä muissa KYT hankkeissa.

6.3.3 Bentoniitin paisuntapaine – UEFBENT (Hanke 11)

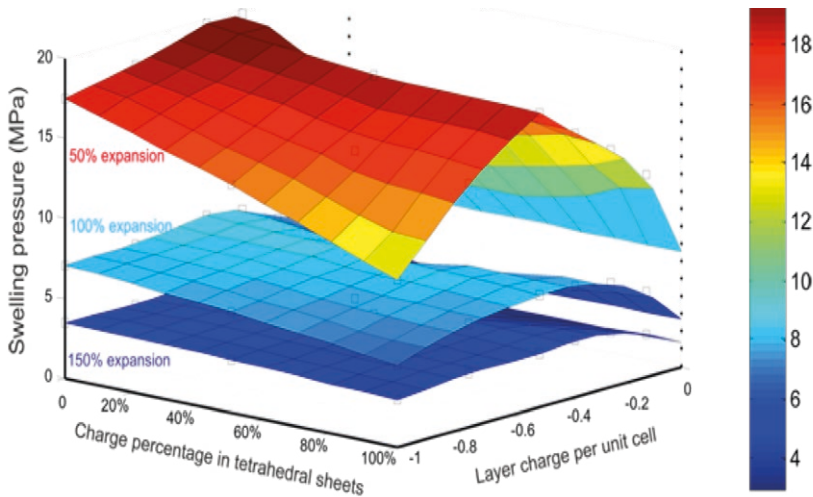
Tapani Pakkanen, Linlin Sun, Janne Hirvi, Bukunmi Akinwunmi, Aderemi Fayoyiwa
Kemian laitos, Itä-Suomen yliopisto

Tutkimusaihe ja keskeiset tulokset

Tutkimuksen pääkohde on puskurimateriaalina käytettävän bentoniittisaven paisuntapaineen määrittäminen molekyylihallituksen avulla. Bentoniitin paisuntapaine on puskurin keskeinen fysikaalinen suure, joka määrää sen käytettävyyden ja toiminnan kapselin ja kallioluolan välissä. Paisuntapaine voidaan mitata kokeellisesti laboratorioissa savinäytteille. Bentoniittisavella ja sitä ympäröivällä vesiliuoksella on paljon rakenteellisia ja kemiallisia muuttujia, jotka vaikuttavat saven paisunt ominaisuuksiin. Parametriavaruuden kattava kokeellinen kartoitus vaatisi hyvin suuren työmäärän ja tiettyjen rakenneparametrien vaikutusta paisuntapaineeseen ei ole käytännössä mahdollista tutkia kokeellisesti.

Tutkimuksessa on kehitetty bentoniitin paisuntapaineen mittausta jäljittelevä simulaatiomalli, jonka on osoitettu toistavan kokeellisten paisuntapainemittausten trendit. Malli on kahden savilevyn systeemi, joka on upotettu vesilaatikkoon. Se poikkeaa aikaisemmista malleista siten, että veden virtaus levyjen väliin on mahdollista ja siten paisumispaineen määrittäminen voidaan toteuttaa.

Tutkimus aloitettiin smektiitin, eli paisuvan bentoniittisaven rakenneparametrien tarkastelulla. Smektiitin paisumisominaisuus johtuu sen oktaedristen kerrosten alumiiniatomien korvautumisella magnesiumatomeilla ja tetraedrisen kerroksen piiatomien korvautumisella alumiiniatomeilla. Korvautumiset johtavat kerrosten varautumiseen ja mahdollistavat paisumisilmiön. Tutkimuksessa selvitettiin aluksi ionien korvautumisen rakennemuutokset alumiinisilikaattikerroksissa, jonka jälkeen kartoitettiin systemaattisesti kokonaisvarauksen ja okta- ja tetraedristen kerrosten varausjakautuman vaikutus paisuntapaineeseen saven kuivatiheyden funktiona. Tutkimustuloksella, joka on esitetty kuvassa 13, voidaan arvioida luonnon bentoniittimateriaalien paisuntapaineita, kun niiden rakennetiedot ovat käytettävissä. Suurimman paisuntapaineen kehittää montmorilloniittisavi, jossa kahdeksasosa oktaedrisen kerroksen alumiini-ioneista on korvautunut magnesiumioneilla. Tulos vastaa hyvin kokeellisia havaintoja, sillä vastaavalla Wyoming tyyppisellä bentonitilla on suuri paisuntapaine.



Kuva 13. Natriumsmektiittien paisuntapaine 50 %, 100 % ja 150 % laajentumisissa vastaten kuivatiheyksiä 1650 kgm^{-3} , 1240 kgm^{-3} ja 990 kgm^{-3} .

Tutkimuksen seuraavassa vaiheessa selvitettiin smektiitin rautapitoisuuden vaikutusta paisuntapaineeseen. Luonnon bentoniiteissa Fe^{3+} ja Fe^{2+} ionit korvaavat tyypillisesti alumiini ja magnesium ioneja oktaedrisessä kerroksessa. Simulaatioissa selvitettiin Fe^{3+} ionien vaikutusta, sillä se on vallitseva raudan muoto luonnon näytteissä. Tulokset osoittivat, että alumiinin korvautuminen raudalla vaikuttaa paisuntapainetta alentavasti, erityisesti montmorilloniittityyppisillä bentoniiteilla. Paisuntapaineen aleneminen on jäljitettävissä saven suurentuneeseen kuivatiheyteen. Tulokset vastaa myös hyvin kokeellisia havaintoja ja sitä voidaan käyttää rautapitoisten luonnonsavien paisuntaominaisuuksien ennustamiseen.

Bentoniittisaven tärkeä rakenteellinen muuttuja on myös alumiinisilikaattikerrosten välissä olevan vesitilan ionikoostumus. Kerrosten ionien korvautumisesta johtuva negatiivinen kerrosvaraus neutraloituu väliveden positiivisilla ioneilla. Ne ovat tyypillisesti Na^+ tai Ca^{2+} ioneja, jotka voivat vaihtua smektiittipartikkelia ympäröivän vesiliuoksen ionikoostumuksen johdosta. Simulaatiolla olemme selvittäneet, miten natriumkloridi ja kalsiumkloridiliuokset vaikuttavat montmorilloniitin paisuntapaineeseen. Paisuntapaine alenee ionivahvuuden kasvaessa ja välivesien natriumionit vaihtuvat kalsiumioneihin jos liuoksessa on runsaasti kalsiumkloridia. Vesitilan ionitutkimuksia on laajennettu myös kalium- ja cesiumkloridien tarkasteluun. Tulokset ovat hyödyllisiä, kun arvioidaan bentoniittipuskurin käyttäytymistä loppusijoituksen vaihtelevissa liuosoloissa.

Tutkimushankkeen viimeisessä osassa selvitettiin lämpötilan vaikutusta montmorilloniitin paisuntapaineeseen. Simulaatiot aloitettiin tilasta, jossa lämpötila on -120°C ja sitä jatkettiin hitaasti lämmittämällä. Jäätynyt smektiitti ei odotetusti paisu, mutta lämpötilan lähestyessä huoneen lämpötilaa, paisuntapaine alkaa kasvaa. Korkeammissa lämpötiloissa paisuntapaine kasvaa hitaasti lämpötilan funktiona. Bentoniitin paisuntaominaisuuksien lämpötilakäyttäytyminen on tärkeä tieto, sillä ydinjätekap-seli tuottaa loppusijoituksen alkuvaiheessa lämpöä, joka siirtyy bentoniittipuskuriin.

Molekyyli mallitustutkimuksilla on selvitetty puskurin bentoniittimateriaalien keskeisten rakenne- ja olosuhdetekijöiden vaikutuksia paisuntapaineeseen.

Tulosten merkitys ydinjätehuollon tutkimuksen kannalta

Tutkimuksen tulosten merkitys liittyy bentoniittipuskurin materiaalivalintaan, paisumisen hallintaan ja sen käyttäytymiseen erilaissa oloissa. Bentoniitin valinnassa on keskeistä tuntea sen paisuntapaine ja vedenjohtavuus kuivatiheyden funktiona. Bentoniitit ovat luonnonmateriaaleja, joille on ominaista rakenne- ja koostumusvaihtelut. Tämä tutkimus mahdollistaa näiden materiaalien systemaattisen paisuntaominaisuuksien kartoittamisen ja ennustamisen erilaisissa liuosoloissa ja lämpötiloissa. Tuloksia voidaan käyttää bentoniittimateriaalien valinnassa ja loppusijoitukseen valittujen bentoniittien käyttäytymisen ennakkoinnissa. Tutkimuksilla on kiinteä yhteys kokeellisiin mittaustutkimuksiin ja niitä voidaan myös kytkeä yleisiin THMC malleihin tuottamaan atomitason perustietoa.

Tutkimuksessa käytetyt menetelmät

Tutkimuksen keskeinen työväline on molekyylidynamiikkasimulaatio. Se perustuu kemiallisen systeemin atomien vuorovaikutusten kuvaamiseen klassisen mekaniikan voimakentällä. Simulaatiossa atomit liikkuvat Newtonin lakien mukaisesti ja saavuttavat tasapainotilan simulaation edetessä. Bentoniittimallituksessa kuvataan systeemin kaikki atomit eksplisiittisesti, niiden lukumäärä on tyypillisesti kymmeniä tuhansia. Dynamiikkasimulaatiossa määritetään bentoniitin paisuntapaine kullekin parametrijärjestelmälle joista bentoniitin kuivatiheys on yhteinen muuttuja.

6.4 Kapselin toimintakyky

6.4.1 Koordinoitu hanke – Kapseli (Hankkeet 12–16)

Juhani Rantala, Jarkko Metsäjoki, Tom Andersson, Anssi Laukkanen, Kari Korhonen, Tuomo Kinnunen, Rami Pohja, Pertti Auerkari, VTT

Sven Bossuyt, Hannu Hänninen, Yuriy Yagodzinsky, Antti Forsström, Aalto-yliopisto

Jari Aromaa, Atte Tenitz, Aalto-yliopisto

Leena Carpen, Pauliina Rajala, Maija Marja-aho, Elina Huttunen-Saarivirta, Malin Bomberg, Elisa Isotahdon, VTT

Pauliina Rajala, Leena Carpen, Maija Marja-aho, Elina Huttunen-Saarivirta, Malin Bomberg, Elisa Isotahdon, VTT

Tässä projektissa on viisi osaprojektia, jotka kaikki tarkastelevat kuparikapselia joko mekaanisen käyttäytymisen tai korroosion näkökulmasta. PRECO-projekti tarkasteli kuparin virumiskäyttäytymistä, kun taas MECHACOP-projektissa tutkittiin vaurion paikallistumista kuparin hitseissä ja vedyn vaikutuksia kuparissa ja sisäosan valuraudassa. REPCOR projektissa tutkittiin kuparin yleistä korroosiota ja karakterisoitiin oksidikerrokset ja korroosiotuotteet. Mikrobiologista korroosiota tutkittiin hapellisen vaiheen osalta MICOR-projektissa ja hapettoman vaiheen osalta BASUCA-projektissa.

KAPSELI-hankkeessa järjestettiin kuparin korroosioseminaarit vuosina 2016 ja 2017, joissa esityksiä saatiin organisaatiosta STUK, Aalto, VTT, Posiva ja SKB.

Experimentally verified model based predictions for integrity of copper overpack (PRECO)

PRECO-projektissa on keskitytty tutkimaan Cu-OFP:n virumiskäyttäytymistä. Kuormitus, jonka kuparivaippa loppusijoituksessa kokee, on yhdistelmä epätasaisia kuormannousuja, joita seuraa relaksaatiovaihe. Lopulta kuparivaippa tulee kontaktiin sisäosan kanssa, jonka jälkeen viruminen ja relaksaatio keskittyvät hitsin juureen. Sen vuoksi sekä virumista että relaksaatiota kuparissa on tutkittu kokeellisesti ja mallinnettu. Malleja on sovellettu kapselin FE-laskennassa, jonka avulla jännitys- ja venymäjakaumat kapselin eri osissa on laskettu.

Kuparin relaksaatiota on tutkittu kokeellisesti lämpötiloissa 80 °C, 60 °C ja 40 °C ja tulokset on sovitettu relaksaatiomalliin. On suoritettu myös kokeita, joissa relaksaatio-

sykli on toistettu siten, että ensimmäisen relaksaatiosyklin jälkeen venymä on palautettu nolleen ja koe on toistettu useamman kerran samalla alkuvenymällä.

Kaksi hyvin pitkäaikaista virumiskoetta aikaisemmista puiteohjelmista on edelleen käynnissä. Kuparin kuormitushistoriariippuvuuden systemaattinen testaus on käynnissä lämpötiloissa 175 °C ja 90 °C, jolla selvitetään kuormituksen vaikutusta murtoaikaan, kun kuormitus laitetaan päälle portaissa. Yllättävästi murtoaika lyhenee portaittaisen kuormituksen vaikutuksesta. Tämä ilmiö johtuu todennäköisesti uusien dislokaatioiden muodostumisesta, kun kuormaa nostetaan. Sama mekanismi aiheuttaa myös uuden primäärivirumisen vaiheen, kun kesken kokeen kuorma poistetaan ja laitetaan takaisin päälle, joka johtaa murtoajan lyhenemiseen. Kapselin kokema kuorma loppusijoitustilassa tulee päälle portaittaisesti, kun ulkopuolinen paine kasvaa epätasaisesti.

Pitkä koesarja moniaksaalisuuden aiheuttamasta eliniän lyhenemisestä kuparissa on tulossa päätökseen. Tulosten perusteella matalilla jännityksillä kuparin elinikä lyhenee jännityksen moniaksaalisuuden vaikutuksesta. Hitsin juuri on eniten rasitettu kohta kapselissa ja siellä myös jännityksen moniaksaalisuus on suurinta geometrisen constraintin takia.

Argonissa hitsatun hitsin testaus ja metallografiatarkastelu on päättynyt. Hitsin oksidipartikkelit saatiin näkymään vetyhehkutuksen avulla. Tulokset osoittavat, että hitsiin tulee vähemmän oksidipartikkeleita, kun hitsaus suoritetaan suoja kaasussa eikä ilmassa, ja sen ansiosta oksidipartikkelivyöhyke ei säröytynyt, kun sitä kuormitettiin CT-sauvan avulla.

Kuparikapselin mekaaninen lujuus (MECHACOP)

Vuonna 2014 aloitettiin yhteistyö KTH:n kanssa tutkimalla vedyn absorptiota kupariin γ -säteilyn alaisena kokeissa, jotka jäljittelevät mahdollisimman hyvin kuparikapselin loppusijoitusolosuhteita ensimmäisen 1000 vuoden aikana. γ -säteily kiihdyttää merkittävästi sekä korroosiota että vedyn absorptiota kupariin. Lisäksi tutkimus on osoittanut, että γ -säteilyn alaisena kuparin pinnalle muodostuu kaksikerroksinen oksidikalvo, jonka todettiin edistävän jännityskorroosion ydintymistä.

Optista venymämittausta käytettiin kuparihitsien makroskooppisen deformaation analysoinnissa sekä EBW- että FSW-hitsausliitoksille. Tulokset viittaavat siihen, että

muodonmuutoksen paikallistuminen hitsausliitoksissa tapahtuu nopeammin veto-nopeuden hidastuessa. Hitsausvirheet paikallistavat venymää voimakkaasti erityisesti EBW-hitseissä. FSW-hitsit ovat kuitenkin ominaisuuksiltaan lähes perusainetta vastaavia. Posivalta saatiin uusi suojakaasussa hitsattu kapselihitsi, jolle tehtiin vastaavia kokeita. Kokeissa havaittiin, että uusi hitsi venyy vähemmän kuin vanha hitsi. Tämä voi johtua esimerkiksi siitä, että hitsaustyökalun pyörimissuunta on vaihdettu. Tutkimuksia jatkettiin Kyushun yliopistossa vetyvaratuilla näytteillä vedyn vaikutuksen tutkimiseksi oksideja sisältävissä FSW-hitseissä.

Vedyn vaikutusta plastiseen deformaatioon kuparissa tutkittiin vetyvaratuilla eriliskidenäytteillä. Vety aktivoi liukutasoja kuparissa ja johtaa paksujen paikallisten liukunauhojen muodostumiseen. Positroniannihilaatiomittaukset osoittavat, että samanaikaisesti vety edistää vakanssien muodostusta kuparissa ja että vakanssit pyrkivät kasautumaan rykelmiksi ja synnyttävät nano-onkaloita kupariin. Sama ilmiö todennettiin mallintamalla. Nano-onkalot edistävät virumista ja murtumista.

Kuparin sulfidijännityskorroosiota tutkitaan yhteistyössä Studsvikin kanssa. Alustavat tulokset julkaistiin Eurocorr 2017-konferenssissa. Jännityskorroosion etenee kuparin raerajoja pitkin ja pienilläkin pohjaveden sulfidipitoisuuksilla syntyi pintavikoja, jotka ydintyvät raerajoille. Lisäksi havaittiin, että jännityskorroosionäytteiden vetypitoisuus nousi kokeen aikana kaksinkertaiseksi verrattuna alkuperäiseen tilaan. Vedyn absorptio on vähäisempää kuormittamattomissa näytteissä. Sulfidijännityskorroosion mekanisme ja vedyn osuutta siinä selvitetään edelleen yhdessä Studsvikin kanssa. Oletettavasti kuparin pinnalle syntyvän oksidi-/sulfidikalvon merkitys on ratkaiseva jännityskorroosion ydintymisen ja etenemisen kannalta.

Sisäosan valuraudalle tehtiin vetokokeita vedyn vaikutuksen alaisena. Valurautaan absorboituu suuria määriä vetyä, joka alentaa sen sitkeyttä ja murtumismekanismi muuttuu hauraaksi. Termisen desorption mittauksissa havaittiin, että kuormitus lisää vedyn absorptiota valurautaan. Tulokset ovat merkittäviä, koska loppusijoitusolosuhteissa korrosio ja neutronisäteily voi johtaa vedyn kertymiseen valurautaan ja sen mekaanisten ominaisuuksien heikkenemiseen sekä murtumismekanismiin muuttumiseen sitkeästä murtumasta haurasmurtumaksi. Tutkimuksia jatketaan koesarjalla valuraudan murtumismekanismien selvittämiseksi ja vedyn absorption ymmärtämiseksi erityisesti grafiittipallojen merkityksen kannalta.

EFC:n 50-vuotis juhlakirjaan kirjoitettiin kappale kuparin ominaisuuksista ydinjätteen loppusijoitusolosuhteissa. Hakija osallistui Ruotsin Kärnavfallsrådetin toimintaan koko hankkeen ajan (Kunskapslägesrapporter 2014-2018, esim. kappale Teknisk och vetenskaplig osäkerhet – osäkerheter med avseende på kapsel och insats) ja SKB:n FUD-ohjelman arviointiin (SOU 2017:62) sekä kansainväliseen IGD-TP paneelin työhön (SOU 2018:8).

Reaktiotuotteiden vaikutus kuparin korroosioon loppusijoituksen olosuhteissa (REPCOR)

REPCOR-tutkimushankkeen tavoite oli määrittää kuparin pinnalle muodostuvien korroosiotuotekerrosten vaikutus kuparin korroosioon. Tutkimushankkeessa tarkasteltiin loppusijoitusprosessin eri vaiheita alkaen loppusijoituskapselin varastoinnista latauksen jälkeen, jota seuraa korroosio kaasufaasissa ja edelleen korroosio upotusrasituksessa, jolloin ympäristö on ensin happipitoinen ja myöhemmin happiköyhä. Kuparin pinnalle muodostuvat korroosiotuotekerrokset voivat olla joko suojata korroosiolta tai lisätä korroosiota. Yleisesti ottaen ehjät ja kattavat oksidikerrokset ovat suojaavia, mutta vaurioituneet oksidikerrokset voivat kiihdyttää korroosiota paikallisesti alueilla, joissa kuparia on paljastunut oksidikerroksen alta. Koska kuparikapselin pinta-ala on suuri, vaurioiden esiintyminen kapselin pinnan oksidikerroksessa on mahdollista.

REPCOR-hankkeen tutkimustehtävät olivat selvittää korroosiotuotekerroksen muodostuminen ja sen karakterisointi sekä selvittää korroosiotuotekerrosten vaikutus kuparin korroosionopeuteen. Kuparin hapettaminen ilmassa lämpötilassa $T \approx 100\text{ °C}$ tuotti muutamassa päivässä oksidikerroksia, joiden paksuus oli muutamankymmenen tai joitain satoja nanometrejä. Tämä oksidikerroksen paksuus on samaa suuruusluokkaa kuin mitä tällä hetkellä on arvioitu oksidikerroksen paksuudeksi. Korroosiotuotekerrokset analysoitiin pelkistämällä ne sähkökemiallisesti. Ilmassa hapettamalla muodostuneet oksidikerrokset sisälsivät pääosin Cu_2O ja jonkun verran CuO . Upotusrasituksessa muodostuneet oksidikerrokset sisälsivät Cu_2O . Ilmassa hapettamalla muodostuneet oksidikerrokset kasvoivat upotusrasituksessa paksummiksi silloin, kun liuosympäristö oli kyllästetty ilmalla, mutta ne liukenivat, kun ympäristö oli niukkahappinen.

Kun kuparin pinnalla ei ollut oksidikerrosta, sen korroosionopeus niukkahappisessa vedessä oli muutamasta mm vuodessa muutamaan kymmeneen mm vuodessa

riippuen veden koostumuksesta. Ilmalla kyllästetyssä vedessä korroosionopeudet olivat satoja mm vuodessa. Veden ominaisuuksilla on monimutkaisia vuorovaikutuksia ja yleiset trendit olivat seuraavat: Ympäristön muuttaminen niukkahappisesta ilmalla kyllästetyksi voi kasvattaa korroosionopeutta kaksi kertaluokkaa. Vedessä, jolla on matala pH, luokkaa 4, korroosionopeus voi olla jopa 20 kertaa suurempi kuin neutraalissa vedessä. Liuenneiden suolojen pitoisuuden kasvu saattoi kasvattaa korroosionopeuden viisinkertaiseksi ja lämpötilan nosto seitsemänkertaiseksi.

Painohäviömittauksissa näytteiden, joiden pinnalle oli muodostettu oksidikerros, korroosio oli aluksi nopeaa kvartsikidemikrovaalla mitattuna, mutta tasoittui muutaman kymmenen minuutin aikana. Nopean alkuvaiheen jälkeenkin hapetettujen näytteiden korroosio oli 2–5 kertaa nopeampaa kuin hapettamattomien näytteiden. Tämä viittaa siihen, että oksidikerroksen jäämät näytteen pinnalla nopeuttavat paljastuneen kuparin korroosiota.

Ilmassa muodostuneiden oksidikerrosten paksuus ja koostumus vastasivat nykyisiä arvioita. Upotuksessa muodostuneet oksidikerrokset ovat monimutkaisempia, ja niissä olevien muiden yhdisteiden kuin oksidien tunnistaminen ei ollut mahdollista valitulla analyysimenetelmällä. Pinnaltaan hapetetun kuparin käyttäytyminen upotusrasituksessa viittasi siihen, että oksidikerrokset voivat kiihdyttää kuparin korroosiota. Tämä tarkoittaa sitä, että oksidikerroksen vaurioituminen kapselin sijoittamisessa voi johtaa väliaikaisesti paikalliseen korroosioon. Ympäristön muutosten vaikutus korroosioon noudatti tunnettuja trendejä. REPCOR-hankkeen lyhyissä kokeissa havaitut korroosionopeuden muutokset olivat suuria, mutta aikaisemmin raportoitujen pitkäaikaisten kokeiden perusteella korroosionopeudet pienenevät kuukausien tai vuosien aikajänteellä.

Loppusijoituksen aerobisen vaiheen mikrobiologinen korroosio (MICOR)

MICOR-hankkeen tavoitteena oli arvioida mikrobiologisen toiminnan vaikutusta kuparikapselin korroosiokäyttäytymiseen Suomen loppusijoitusolosuhteissa hapellisessa eli aerobisessa lämpimässä vaiheessa sekä arvioida kapselin läheisyyteen syntyvän mikrobiologisen toiminnan vaikutuksia kapselin toimintakyvyn kannalta. Tarkasteltaessa kuparikapselin käyttäytymistä loppusijoitustilassa, voidaan olosuhteet jakaa hapelliseen ja hapettomaan vaiheeseen, joiden aikaiset pääasialliset korroosiomekanismit eroavat toisistaan. Myös mikrobiologiset prosessit eroavat

näiden vaiheiden aikana. Samanaikainen KYT-hanke BASUCA keskittyi hapettoman vaiheen mikrobiologisten korroosiovaikutusten arviointiin.

Projektissa kokeita tehtiin sekä ilman mikrobeja (ns. abioottisissa olosuhteissa) että mikrobirikastetuissa pohjavesissä (bioottinen koe). Mikrobirikastus tehtiin Olkiluodon pohjavedestä realististen olosuhteiden luomiseksi. Kokeisiin lisättiin myös bentoniittia yhteisvaikutusten arvioimiseksi. Abioottisissa olosuhteissa korroosionopeudet olivat useimmissa kokeissa matalampia kuin mikrobien läsnä ollessa. Käytetty koelämpötila vaikutti korroosionopeuteen ja korroosiotuotekerrosten muodostumiseen. Korkeimmat painohäviöiden perusteella havaitut keskimääräiset korroosionopeudet, n. 25 $\mu\text{m/a}$, havaittiin 60 °C bioottisessa kokeessa ja matalimmat 24 °C asteen kokeessa (3.5 $\mu\text{m/a}$). Bentoniittiin upottaminen vaikutti näytteiden korrosiokäyttäytymiseen selkeästi ja aiheutti hajontaa tuloksissa. Koetulosten perusteella bentoniitti oli hapellisissa olosuhteissa isompi mikrobien lähde kuin loppusijoitusalueen pohjavesi.

Hankkeen tuloksia voidaan hyödyntää ydinjätehuollon pitkäaikaisturvallisuuden aihepiirissä arvioitaessa kapselin aerobisen vaiheen korroosionopeuksia ja lisäksi jo aiemmin tehtyjen mallien oikeellisuutta. MICOR- ja BASUCA-hankkeissa toteutettiin osittain rinnakkaisia mittauksia, joten koejärjestelyn rakentaminen ja kehitys tehtiin yhteistyössä hankkeiden välillä. Lisäksi hankkeiden tulokset yhdistettynä lisäävät ymmärrystä eri vaiheiden korroosiovaikutuksista kuparikapselissa.

Hankkeen pitkiä laboratoriokokeita tehtiin kolmessa lämpötilassa 24 °C, 37 °C ja 60 °C. Kokeissa käytettiin ONKALO:sta kerättyä vettä. Koeastiat täytettiin osittain toimitustilaisella tai steriloidulla MX-80 bentoniitilla. Bioottisissa kokeissa koeastioihin lisättiin mikrobirikaste, abioottiset kokeet toteutettiin käyttämällä glutaraldehydiä biosidina. Näytemateriaalina oli OFP-kupari, josta valmistettiin painohäviönäytteet, biofilminäytteet sekä sähkökemialliset näytteet. Bioottisissa kokeissa altistettiin myös U-sauvoja jännityskorroosion tutkimiseksi. Sähkökemiallisessa koesarjassa näytteiden korroosionopeutta ja pintailmiöitä mitattiin jatkuvasti määrittämällä lineaarinen polarisaatiovastus (LPR), ns. Tafel käyrät, EFM-mittaukset, ER-vastuskalvo-mittaukset ja impedanssimittaukset (EIS). Kokeita tehtiin 3, 5, 9 ja 10 kk pituisina sarjoina. Altistetut näytteet tarkasteltiin kokeen jälkeen elektronimikroskoopilla (SEM) ja siihen liitetyllä alkuaineanalysaattorilla (EDS) korroosiotuotekerrosten tunnistamiseksi. Korroosiotuotteita karakterisoitiin myös röntgendiffraktometrillä (XRD).

Kokeissa käytettyä Olkiluodon pohjavettä analysoitiin ennen ja jälkeen kokeiden vesikemian muutosten havaitsemiseksi.

Kvantitatiivista PCR menetelmää (qPCR) käytettiin määrittämään bakteerien ja arkeonien 16 rRNA geenikopioiden, sulfaatinpelkistäjien *dsrB* geenikopioiden ja metanogeenien *mcrA* geenikopioiden määrät biofilmin ja veden mikrobiitiheyden arvioimiseksi. Menetelmällä todettiin, että mikrobeja oli biofilmeissä ja vedessä hyvin vähän. Tehosekvensointimenetelmällä pyritään tunnistamaan biofilmin ja veden mikrobiyhteisöjen koostumukset. Sekvenssianalyysi on parhaillaan meneillään.

Mikrobiologisen toiminnan vaikutus kuparin korroosioon loppusijoituksen hapettomissa olosuhteissa (BASUCA)

BASUCA-hankkeen tavoitteena oli arvioida mikrobiologisen toiminnan vaikutusta kuparikapselimateriaalin käyttäytymiseen loppusijoituksen ns. hapettoman vaiheen aikana ja kehittää osaamista ja luotettava koejärjestely kuparin mikrobiologisen korroosion arvioimiseksi Suomen loppusijoitusolosuhteissa. Tavoitteet saavutettiin luomalla laboratorioon soveltuva koeympäristö, jossa kuparikapselimateriaalin korroosiota voidaan tutkia luotettavasti ja monipuolisesti sekä mikrobien läsnä ollessa että ilman niitä. Uusien menetelmien avulla selvitettiin pinnoille kerääntyvän biofilmin ominaisuuksia, korroosiotuotteen ominaisuuksia ja mikrobi – metalli vuorovaikutuksia.

Projektissa keskityttiin loppusijoitusajanjakson myöhäisempiin vaiheisiin, jolloin kaikki happi on kulunut pois loppusijoitustilasta ja lämpötila on vähitellen laskenut ympäröivän kallioperän lämpötilaan (tutkitut lämpötilat 10 ja 37 °C). Oletuksena on myös, että kupari on kosketuksissa pohjaveden kanssa eli simuloidaan pahinta mahdollista tilannetta, jolloin bentoniittipuskuri ei enää suojaa kuparikapselia. Koeympäristössä (simuloitu vesi) on kuitenkin otettu huomioon bentoniittikerroksen vaikutukset pohjaveden kemiaan. Yksi koesarja tehtiin myös Onkalon kairanreikävedessä.

Tutkimusohjelman aikana projektissa tehtiin useita laboratoriokoesarjoja korroosion arviointiin. Tietoja OFP-kuparin korroosiokäyttäytymisestä saatiin yhdestä n. 4 kk ja kahdesta n. 12 kk koesarjasta, joissa oli sähkökemiallisten näytteiden lisäksi painohäviönäytteet ja näytteet mikrobiologisia määrittäyksiä varten sekä U-sauvat jännityskorroosioalttiuden toteamiseksi. Osa painohäviömäärittäyksiin menevistä

kuparinäytteistä hapetettiin (90 °C, 7 vrk) ennen anaerobiseen kokeeseen laittamista. Vastaavanlainen koe tehtiin myös hapellisessa vesi+bentoniitti-ympäristössä ensin olleelle näytteelle (MICOR-BASUCA koe). Tuloksia verrattiin tuoreisiin kuparinäytteisiin, joissa ei ole vastaavanlaista hapettumakerrosta valmiiksi.

Ensimmäisissä kokeissa tutkittiin sulfaattia pelkistävien bakteerien ja metanogeenien arkkien korroosiovaikutuksia verrattuna ilman mikrobeja tehtyihin vastaavissa ympäristöissä tehtyihin kokeisiin. Bioottisessa ympäristössä kuparin pinnalle muodostui sekä kuparisulfidia että kuparin oksideja, steriilissä (abioottinen) ympäristössä ainoastaan kuparin oksideja. Korroosionopeudet (tasainen korroosio) olivat pieniä kaikilla käytetyillä analyysimenetelmillä. Painohäviön perusteella keskimääräinen korroosionopeus steriilissä ympäristössä oli 4 kk:n altistuksen jälkeen hieman suurempi (1,2 µm/a vs. 0,2 µm/a) kuin bioottisessa ympäristössä, mikä viittaa siihen, että tässä tapauksessa muodostunut biofilmi pikemminkin suojaa kuin edesauttaa (tasaista, yleistä) korroosiota. Molemmissa ympäristöissä todettiin kuitenkin SEM-tarkastuksessa pieniä pistesyöpymiä. Bioottisessa ympäristössä todettiin myös viitteitä alkavaan jännityskorroosioon. Steriilissä ympäristössä oli lisäksi lievää rakkorossoiota. Pidemmän koeajan (12 kk) LPR-mittausten ja painohäviöistä lasketujen korroosionopeuksien perusteella korroosio oli molemmissa ympäristöissä samaa luokkaa, ollen bioottisessa ympäristössä (1.18 µm/a) hieman suurempaa kuin abioottisessa (0.95 µm/a). Korkeammassa lämpötilassa sulfaattia pelkistävien bakteerien ja/tai asetogeenien läsnä ollessa painohäviömääritysten perusteella lasketut korroosionopeudet olivat samaa luokkaa lukuun ottamatta ensin hapellisessa ympäristössä ollutta näytettä, jonka korroosionopeus oli huomattavasti suurempi kuin koko altistusajan hapettomissa olosuhteissa olleiden näytteiden. Sulfaattia pelkistävillä bakteereilla rikastetussa ympäristössä olleissa näytteissä todettiin pistesyöpymistä, ja näitten näytteiden pinnoilla todettiin myös suurin määrä sulfaattia pelkistäviä bakteereita. Merkittävää oli myös se, että ns. esihapettettujen näytteiden korroosionopeudet olivat suuremmat kuin ns. tuoreiden näytteiden. Tämä osoittaa, että on tärkeää tutkia korroosioilmiöitä huomioiden koko loppusijoitusajanjakso.

Tutkimuksen tuloksia hyödynnetään ydinjätehuollon pitkäaikaisturvallisuus aihepiirissä kapselin toimintakykypainoalueella arvioitaessa korroosionopeuksia ja korroosiovaikutusten arvioimiseksi tehtyjen mallien oikeellisuutta. Hankkeessa on kehitetty koejärjestely, jonka avulla kuparin korroosiota voidaan tutkia erilaisissa lämpötiloissa hapettomassa ympäristössä sekä mikrobien läsnä ollessa että ilman niitä. Projektissa tehtiin yhteistyötä koordinoituun Kapselihankeeseen kuuluvien

MICOR- ja REPCOR-hankkeiden kanssa simuloimaan loppusijoituksen kehittyvää ympäristöä ja olosuhteiden muutoksen vaikutusta pinnan kerrostumiin.

Hankkeessa käytettyjä online-mittausmenetelmiä kuparin korroosion tutkimiseen ja molekyylibiologisia mikrobimääritysmenetelmiä voidaan hyödyntää laajasti erilaisissa sovellutusympäristöissä. Hankkeessa toteutettiin opinnäytetyö yhteistyönä koordinoitun MILORI (Ydinjätteen loppusijoituksen mikrobiologiset riskit) konsortion hankkeiden kanssa. Opinnäytetyö vahvisti hankkeiden välistä tiedonvaihtoa ja synergiaa sekä tarjosi opiskelijalle monialaisen tukiryhmän opinnäytetyötä varten.

6.5 Mikrobiologian vaikutukset

6.5.1 Koordinoitu hanke – Ydinjätteen Loppusijoituksen Mikrobiologiset Riskit – MILORI (Hankkeet 17–19)

Minna Vikman, Mirva Pyrhönen, VTT

Leena Carpen, Pauliina Rajala, Maija Marja-aho, Elina Huttunen-Saarivirta, Malin Bomberg, Elisa Isotahdon, VTT

Hanna Miettinen, Atte Mikkelsen, VTT

Mikrobiologiset riskit korkea-aktiivisen ydinjätteen loppusijoitusolosuhteissa liittyvät vapautumisesteiden toiminnan heikkenemiseen, jolloin radionuklidit voivat kulkeutua loppusijoitustilasta biosfääriin saakka. Mikrobit ja niiden aineenvaihduntatuotteet voivat aiheuttaa kuparikapselin korroosiota ja bentoniittipuskurin ominaisuuksien heikkenemistä. Matala-aktiivisen ja keskiaktiivisen jätteen loppusijoituksessa voi puolestaan orgaanisen jätteen biohajotessa muodostua kaasua, joka osaltaan edistää kaasumaisten radionuklidien (esim. ^{14}C) kulkeutumista sekä aiheuttaa loppusijoitustilan paineistumista. Lisäksi metallipitoisen purkujätteen mikrobiologinen korroosio voi aikaansaada radioaktiivisten ainesosien oletettua nopeampaa vapautumista ympäristöön. Koordinoitun MILORI-hankkeen tavoitteena oli kasvat-
taa tietämystä tällä aihealueella ja jatkaa KYT2010- ja KYT2014-tutkimusohjelmissa aloitettua mikrobiologisen aihealueen tutkimusta. Koordinoituun MILORI-hankkeeseen kuului kolme erillistä osaprojektia Geobiokierto, CORLINE ja MAKERI, joissa saatuja tuloksia on kuvattu seuraavissa kappaleissa. Projektin tuloksia esiteltiin myös keväällä 2018 järjestetyssä seminaarissa 'Ydinjätteen loppusijoituksen mikrobiologia', jonka esitykset ovat nähtävillä KYT2018-tutkimusohjelman verkkosivuilla.

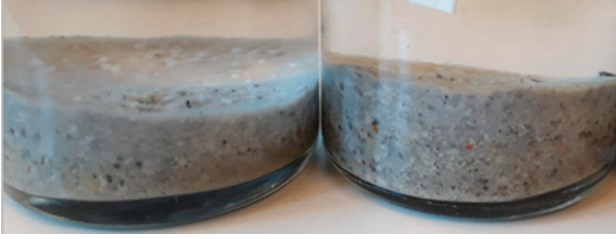
Mikrobiyhteisöjen rikkimetabolia loppusijoitusolosuhteissa, Geobiokierto, Hanna Miettinen, VTT

Hankkeen ensimmäisenä tavoitteena on ollut syvien pohjavesimikrobiprosessien tutkiminen hyödyntämällä ja kehittämällä leimattua sulfaattia ($^{35}\text{SO}_4$) käyttävää menetelmää biologisen sulfidin-muodostumisnopeuden selvittämiseksi ja rikin kierron tutkimiseksi pohjavesinäytteissä. Hankkeessa kehitettiin erittäin herkkä menetelmä biologisen sulfidinmuodostumisnopeuden määrittämiseksi. Olkiluodon pohjavesistä ja Outokummun syväreian pohjavedestä todettiin hyvin erilaisia sulfaatinpelkistysnopeuksia eri tyyppisistä vesistä. Mikrobiologinen sulfaatinpelkistys saatiin myös käynnistettyä pohjavedessä, jossa sitä ei todettu ennen elektronin luovuttajan kuten asetaatin lisäämistä näyteveteen. Tämä tulos indikoi sopivan elektroninluovuttajien puutteen rajoittavan mikrobiologista sulfaatinpelkistystä tietyn tyyppisissä pohjavesissä. Vesityypistä riippuen sulfaatin, asetaatin ja mahdollisesti metaanin voitiin todeta voimistavan sulfaatin pelkistymistä, toisaalta erityyppisessä vedessä asetaatti ja nitraatti hidastivat sulfaatin pelkistymistä. Menetelmän avulla voitiin osoittaa myös käynnissä oleva ns. kryptinen rikinkierto, jossa biologisesti pelkistynyt rikki hapettui uudelleen mikrobiologisesti, jolloin pohjaveden sulfaatinpelkistymisen todellinen laajuus jää havaitsematta tavanomaisin menetelmin. Mikrobiologinen sulfaatinpelkistys on monimutkainen prosessi, johon vaikuttavat mikrobilajit ja niiden käytettävissä olevien elektroninluovuttajien ja -vastaanottajien määrät, sillä mikrobiyhteisössä aktiivisimpia kullakin hetkellä ovat ne mikrobit, jotka hyödyntävät tehokkaimmin tarjolla olevia energialähteitä. Hankkeen avulla voitiin osoittaa ja todentaa mikrobiologinen sulfidinmuodostus ja sen voimakas vaihtelu eri pohjavesissä sekä sulfidinmuodostukseen liittyvien elektroninluovuttajien ja -vastaanottajien määrien aiheuttamat muutokset sulfidinmuodostukselle.

Sulfaatinpelkistykseen liittyviä tuloksia voidaan hyödyntää arvioitaessa mikrobiologisen sulfidinmuodostuksen aiheuttamaa riskiä kuparikapselin korroosiolle eri olosuhteissa. Tulosten avulla voidaan arvioida muodostuvan sulfidin määriä ja mallintaa mikrobitoiminnan aiheuttamia korroosioriskejä kapselin pitkäaikaisturvallisuudelle. Tutkimus on tuottanut runsaasti tietoa leimattua sulfaattia hyödyntävästä menetelmästä, jota voidaan hyödyntää ydinjätteen loppusijoitusalueen pohjavesien sulfidien muodostumisen monitoroinnissa.

Hankkeen toisena tavoitteena on ollut arvioida syvien pohjavesien mikrobien vaikutusta bentoniitin rakenteen ja toimintakyvyn pysyvyyteen. Kokeiden tarkoituksena

oli selvittää mikrobiaktiivisuuden vaikutuksia ns. "worst case"-olosuhteissa, jotka voivat toteutua paikallisesti mm. loppusijoitustilojen kallion, pohjaveden ja bentoniitin rajapinnoissa, jossa bentoniitti ei ole vielä täydessä toimintakyvyssä. Kokeet on toteutettu KYT Geobiokierto ja EURATOM MIND-hankkeiden yhteistyönä. Vuoden säilytyksen jälkeen voitiin todeta, ettei bentoniitin rakenteessa havaittu merkittäviä muutoksia, tosin kationinvaihtokapasiteetti-arvot (CEC) nousivat hivenen mikrobiologisissa hapettomissa bentoniiteissa. Voitiin myös havaita, että mikrobi-toiminta kulutti hapellisista olosuhteista aloitetuissa kokeissa hapen muutaman kuukauden aikana loppuun, vastaavasti hapettomissa olosuhteista aloitetuista koepulloista (kuva 14) vety käytettiin muutaman viikon sisällä. Bentoniittinäytteen kemiassa ja mikrobiologiassa havaittiin selviä muutoksia jo vuoden säilytyksen jälkeen ja mm. sulfaatinpelkistys oli käynnistynyt hapettomissa mikrobiologiassa näytteissä, mutta sen sijaan hapellisista olosuhteista käynnistetyissä näytteissä ja kontrollinäytteissä sulfaatinpelkistystä ei voitu todeta. Kahden vuoden säilytyksen jälkeen näytteissä ei todettu suuria muutoksia verrattuna vuoden näytteisiin atomivoimamikroskopiolla tai kationinvaihtokapasiteetimäärityksellä. Bentoniittinäytteille kehitetyn DNA-eristysmenetelmän avulla saatiin määritettyä bakteerien, arkeonien, sienten ja sulfaatinpelkistäjien määriä kvantitatiivisen PCR:n (qPCR) avulla. Bakteereja, arkeoneja ja erityisesti sulfaatinpelkistäjiä oli enemmän näytteissä, jotka käynnistettiin hapettomista olosuhteista kuin näytteissä, joissa alkutilanteessa oli happea. Mikrobimäärät pysyivät ajan funktiona lähes samoina tai niiden määrä oli pienessä laskussa. Tulosten perusteella näyttää todennäköiseltä, että pienessä mittakaavassa (nestetilavuus vain 80 ml) energialähteiden väheneminen on alkanut rajoittaa mikrobien aktiivisuutta vuoden säilytyksen jälkeen. Bentoniittikokeiden tulosten perusteella ei voida vielä päätellä, aiheuttaako mikrobi-toiminta riskin bentoniittipuskurin rakenteen ja toimintakyvyn pysyvyydelle rajapinnoissa. Mikrobi-toiminnan aktiivisuuden tasaantuminen energialähteiden vähentyessä sekä mikrobiologisesti ajateltuna lyhyt koeaika jättivät vielä avoimia kysymyksiä liittyen mikrobivaikutusten arvioimiseen. Jäljelle jääneet näytteet tarjoavat kuitenkin mahdollisuuden jatkaa koetta ja esim. lisätä näytepulloihin energialähteitä mikrobeille, jolloin niiden aktiivisuus ja toiminta kiihtyisi uudelleen.



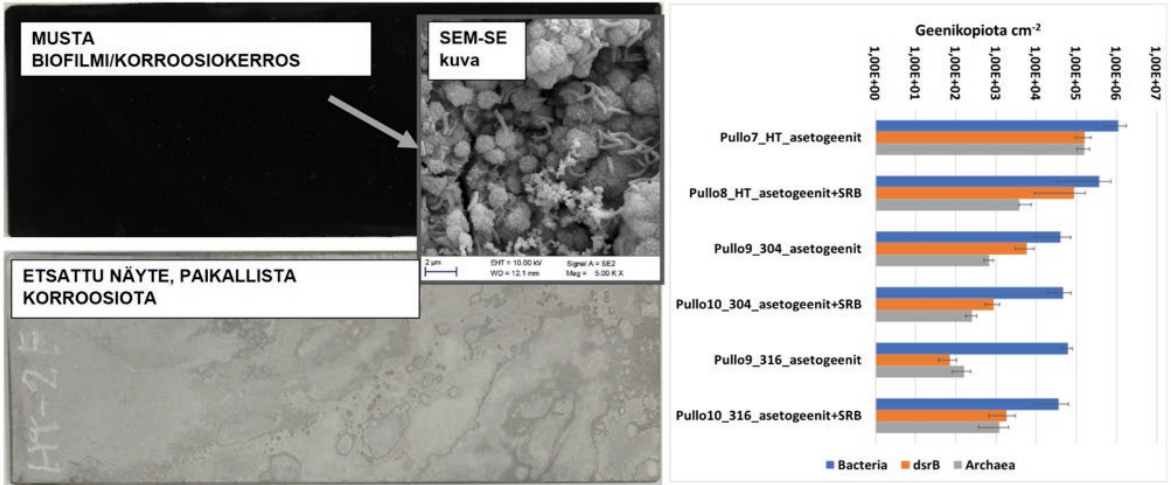
Kuva 14. Hapettomista olosuhteista aloitetut bentoniittikoepullot.

Matala- ja keskiaktiivisen metallijätteen (hiiliteräs ja ruostumattomat teräkset) mikrobiologinen korroosio, Corline, Leena Carpén, Malin Bomberg, Elisa Isotahdon, Pauliina Rajala, VTT

CORLINE-hankkeen tavoitteena oli arvioida biofilmien muodostumista ja mikrobiologisen korroosion riskiä metallisille materiaaleille, lähinnä purkujättemateriaaleille, Suomen loppusijoitusolosuhteissa. Lisäksi tavoitteena oli monitoroida korroosion ja vesikemian muutosten yhteyttä in situ. Tavoitteet saavutettiin luomalla laboratorioon soveltuva koeympäristö, jossa purkujäteterästen mikrobiologista korroosiota voitiin tutkia luotettavasti ja monipuolisesti. In situ olosuhteita tutkittiin asentamalla mittauslaitteisto loppusijoitusluolaan. Uusien menetelmien avulla selvitettiin pinnoille kerääntyvän biofilmin ominaisuuksia, korroosiotuotteen ominaisuuksia ja mikrobi–metalli vuorovaikutusta.

Mikrobilisäykset (sulfaatinpelkistäjät, metanogeenit, asetogeenit) kiihdyttivät kaikkien tutkittujen aineiden korroosiota, kun taas abioottisissa hapettomissa ympäristöissä korroosionopeudet olivat hyvin pieniä. Painohäviöiden perusteella lasketut korkeimmat keskimääräiset korroosionopeudet havaittiin hiiliteräksellä asetogeeniympäristössä (12,2 mm/a). Myös korkeimmat sähkökemiallisilla menetelmillä määritellyt hetkellisen korroosion nopeudet mitattiin asetogeeniympäristössä. Hiiliteräksen keskimääräinen korroosionopeus hapettomassa abioottisessa (biosidipitoisessa/steriloidussa) ympäristössä, 1,1 mm/a/0,4 µm/a, oli korkeampi kuin ruostumattomien teräsnäytteiden, joiden painot eivät käytännössä muuttuneet kokeen aikana ollenkaan. Sähkökemiallisten mittausten mukaan sekä hiiliteräkset että ruostumattomat teräkset olivat alttiita paikalliselle korroosiolle etenkin sulfaattia pelkistävien bakteerien läsnäollessa. Korroosiomittausten lisäksi näytteet tutkittiin

elektronimikroskoopilla, jolloin voitiin todeta korroosiotuotteiden ja mikrobien läsnäolo pinnoilla (kuva 15 vasen).



Kuva 15. Mikrobeja ja korroosiotuotetta SRB- ja asetogeeniympäristössä altistetun hiiliteräsnäytteen pinnalla, (vasemmalla). qPCR menetelmällä arvioituna bakteerien, sulfaatinpelkistäjien (dsrB) ja arkeonien määrät cm⁻² metallien pinnoilla tai mL⁻¹ vesiympäristössä 2L mesokosmoksissa 12 kk:n inkuboinnin jälkeen (oikealla).

Sekvensointitulosten mukaan hiiliteräksen ja ruostumattomien terästen pinnoille tarttuneet metanogeeniset arkeonit olivat erilaisia riippuen teräksestä (Methanobacteria hiiliteräksen pinnalla, Methanomicrobia ruostumattomien terästen pinnalla). Myös bakteerien osalta oli nähtävissä samankaltainen trendi lajiston valikoitumisessa. Tutkitun VLJ-luolan pohjaveden relevantteihin mikrobiotoiminnan aineenvaihduntareitteihin kuuluvat metanogeneesi, sulfaatin pelkistys ja sulfidin muodostus sekä typen aineenvaihduntareitit ja asetaatin tuotto.

Kokeessa muodostuvia kaasuja analysoitiin ja niiden koostumus oli erilainen terästen läsnä ollessa verrattuna pelkkään pohjaveteen ja toisaalta myös erilainen riippuen teräslaadusta. Ilman terästä pelkässä pohjavedessä havaittiin hiilidioksidia. Hiiliteräksen läsnä ollessa hiilidioksidi kului, mutta metaanin määrä lisääntyi viitaten autotrofisten metanogeenisten arkeonien toimintaan. Ruostumattomien terästen kohdalla hiilidioksidia kului vähäinen määrä verrattuna pelkkään pohjaveteen ja vain pieni määrä metaania havaittiin. Ruostumattomien terästen kohdalla rikkinäköisen veden määrä vedessä nousi korkeammaksi kuin hiiliterästä sisältävissä pulloissa.

Tutkimuskohteena oli yleisesti käytettyjä hiiliteräksiä sekä ruostumattomia teräksiä. Sen vuoksi tutkimuksen tuloksia voidaan soveltaa hyvin laajasti arvioitaessa käytön-aikaisten sekä käytöstäpoistovaiheen purkujättemetallien korroosioriskejä. Tulosten hyödyntäjiä voivat näin ollen olla teräsjätettä tuottavat tahot eli lähinnä voimalaitokset, mutta myös viranomaiset. Laboratoriossa suoritettujen mittausten lisäksi projektissa kehitettiin in-situ mittausjärjestelmiä suoraan loppusijoitusluolan kairanreikiin. Korroosion monitorointi oikeissa kenttäolosuhteissa pitkäaikaisesti on tärkeää pitkäaikaisturvallisuuden arvioimiseksi ja sille on tarvetta erilaisissa sovellutuksissa. Tällaista laitteistoa ei kuitenkaan aiemmin ole ollut saatavilla. Osana koordinoitua projektia, CORLINE projekti toimi yhteistyössä muiden projektin hankkeiden kanssa, lisäten yleistä tietämystä mikrobiologisesta korroosiosta. Lisäksi CORLINE:n laboratoriokokeiden kanssa samankaltaisia pitkäaikaisia sähkökemiallisia koesarjoja tehtiin samassa laboratoriossa eri KYT-hankkeissa kuparille, jolloin mittauslaitteiden kehitystyö voitiin käyttää kaikkien projektien hyödyksi.

Projektin aikana suoritettiin useita eri koesarjoja mikrobiologisen korroosion arviointiin laboratoriossa. Laboratoriokokeissa ja VLJ-luolan kokeissa tutkittavana materiaaleina käytettiin hiiliteräksiä (AISI/SAE 1005 tai kylmävalssattu DC01AmO) sekä austeniittisia ruostumattomia teräslaatuja (AISI 304 ja AISI 316). Tietoa korroosionopeuksista saatiin tekemällä kaksi pitkää sähkökemiallista laboratoriokoesarjaa, joissa näytteistä mitattiin säännöllisesti ns. Tafelin käyrät, lineaarinen polarisaatiovastus (LPR), impedanssimittaukset (EIS) ja lepopotentiaalit. Paikallista korroosiota seurattiin MASS-anturoinnilla. Tuloksia verrattiin painohäviöiden avulla määritettyihin korroosionopeuksiin. Lisäksi tehtiin kaasuntuottokoe, kontrollikokeet elatusaineen vaikutuksesta ja kontrollikokeet abioottisissa (sekä steriilissä että biosidin läsnä ollessa) ympäristöissä sekä elektronin siirtokoe. Mikrobien määrät ja yhteisö-rakenteet vesissä ja metallien pinnoilla selvitettiin qPCR menetelmällä (kuva 15 oikea) ja tehosekvensoinnilla.

Laboratoriokokeissa käytettiin Olkiluodon VLJ-luolan kairanreiän KR-9 vettä, josta rikastettiin sulfaatinpelkistäjäbakteereita (SRB), metanogeenisiä arkeoneja sekä asetogeenipopulaatioita. Kenttäkokeet tehtiin Olkiluodon VLJ-luolan kairanrei'issä VLJ-KR19 ja VLJ-KR21. Mittalaitteistoon asennettiin keväällä 2016 ja siihen kuului korroosionmittausyksikkö (sähkökemialliset ja painohäviönäytteet) sekä Osmo-Sampler vesinäytteen keräin, joka keräsi 5-14 ml vesinäytettä kuukaudessa koko kahden vuoden koeajan. Kokeessa seurattiin näytteiden potentiaalia ja lineaarista polarisaatiovastusta, josta voidaan laskea hetkellinen korroosionopeus. Altistettuja

näytteitä analysoitiin sekä kahden vuoden in-situ kokeen ja laboratoriokokeiden jälkeen DNA-pohjaisilla mikrobiologisilla menetelmillä (qPCR), painohäviöanalyysillä sekä biofilmin FE-SEM kuvauksella että analysoimalla pintakerroksia EDS:llä.

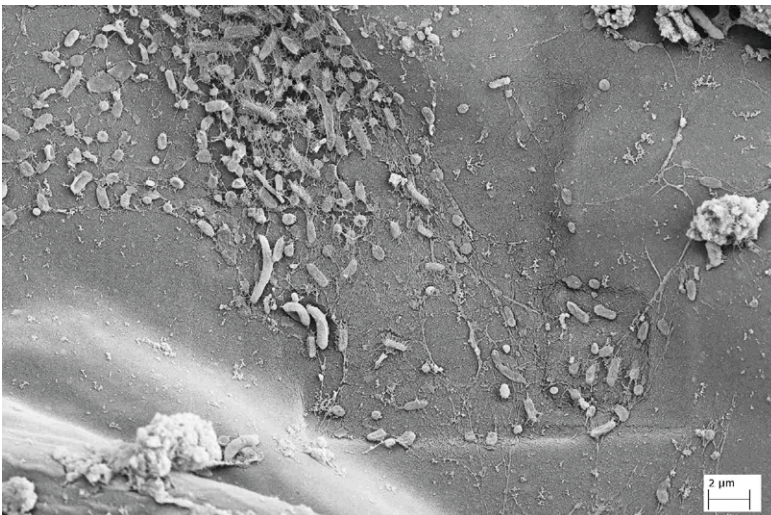
Matala- ja keskiaktiivisen jätteen loppusijoituksen mikrobiologia, Makeri,
Minna Vikman, VTT

Makeri-osahankkeen tavoitteena oli tutkia matala- ja keskiaktiivisen jätteen mikrobiologista hajoamista ja kaasujen muodostumiseen vaikuttavia tekijöitä. Hankkeen tuloksena saatiin uutta tietoa matala-aktiivisen jätteen mikrobiologiseen hajoamiseen ja kaasun muodostumiseen vaikuttavista tekijöistä. Tuloksia voidaan hyödyntää kaasun muodostumisen mallinnuksessa sekä arvioitaessa mikrobiologisia riskejä loppusijoituksessa. Tutkimusympäristöinä hankkeessa olivat laboratoriomittakäytävän simulaatiokokeet sekä TVO:n ylläpitämä *in-situ* Kaasunkehityskoe Olkiluodon VLT-luolassa. Kaasunkehityskokeen osalta analyysit toteutettiin yhteistyössä EURATOM MIND-hankkeen kanssa.

Suomessa ydinvoimaloiden matala-aktiivinen jäte koostuu mm. suojavaatteista, palokankaista, muoveista ja metalleista. Nykykäytännön mukaan matala- ja keskiaktiivinen jäte pakataan hiiliterästyntyreihin ja betonilaatikoihin, jotka lopputuotetaan 60–110 metrin syvyyteen kallioperässä sijaitseviin luolastoihin ja siiloihin. Koska matala-aktiivinen jäte sisältää huomattavia määriä selluloosa- ja hemiselluloosapitoista materiaalia, se on helposti mikrobien hyödynnettävissä. Orgaanista ainesta sisältävän jätteen hajoaminen on monivaiheinen prosessi, jonka lopputuloksena muodostuu hiilidioksidia ja metaania. Betonirakenteista johtuva korkea pH rajoittaa mikrobiaktiivisuutta, mikä todettiin myös tässä hankkeessa. Eräs päätuloksista oli kuitenkin se, että heterogeeniset kemialliset olosuhteet voivat aikaansaada loppusijoitustilaan paikallisia alueita, joissa olosuhteet ovat optimaalisia mikrobien toiminnalle ja kaasujen muodostumiselle. Lisäksi sekä Kaasunkehityskokeessa että simulaatiokokeissa havaittiin, että mikrobiaktiivisuus tuottaa aineenvaihduntatuotteita, jotka voivat laskea loppusijoitustilan pH:ta. Tärkeimmät kaasun muodostumiseen vaikuttavat mikrobiryhmät olivat selluloosaa ja hemiselluloosaa hajottavat mikrobit, metanogeenit (metaanin tuottajat) sekä niiden kanssa kilpailevat mikrobiryhmät kuten sulfaatinpelkistäjät. Mikrobiston koostumuksen tutkimiseen käytettiin pääasiassa molekyylibiologisia menetelmiä (qPCR, sekvenssianalyysi). Metanogeenien toiminnan aktivoituminen ja metaanin muodostuminen edellyttää esim. pH:n laskemista riittävän alas ja sulfaattipitoisuuden laskua. Leimatulla

sulfaattilla ja Kaasunkehityskokeen vesinäytteillä tehdyissä kokeissa havaittiin, että sulfaatinpelkistyminen voi aktivoitua nopeasti, jos loppusijoitustilaan virtaa sulfaattipitoista pohjavettä. Tämä voi heikentää kaasujen muodostumista ainakin lyhyellä aikavälillä. Lisäksi todettiin, että metallien korroosiossa ja jätteen hajoamisprosessissa muodostuva vety hyödynnetään *in-situ* olosuhteissa tehokkaasti mikrobiprosesseissa, eikä vetyä havaittu kaasufaasista.

Kaasunkehityskokeessa tutkittiin myös teräksen korroosiota ja huoltojätteiden pinnalla kasvavaa mikrobistoa kokeeseen asennettujen kapselinäytteiden avulla. Teräksen korroosion todettiin olevan nopeinta tynnyrissä, joka sisälsi eniten selluloosapitoista materiaalia ja jossa mikrobiaktiivisuus oli suurin. Koska kemiallisia mittauksia ei ole voitu tehdä tynnyreistä, joihin kapselit on sijoitettu, ei voida varmuudella sanoa johtuvatko suuret korroosionopeudet korkeammasta mikrobiaktiivisuudesta vai korroosiota edistävistä kemiallisista olosuhteista. Pääasiallisin röntgendifraktio-analyyseissä (XRD) havaittu korroosiotuote teräslevyjen päällä oli sideriitti FeCO_3 , jota on todettu muodostuvan erityisesti metanogeenisissä olosuhteissa. Vaikka alkuaineanalyyseissä havaittiin pieniä määriä rikkiä, ei mikrobiologiseen korroosioon usein liitettyä rautasulfidia havaittu. Huoltojätteiden pinnalta tehdyissä pyyhkäisy-elektronimikroskooppi-kuvissa (FESEM) havaittiin mikrobirykelmiä (kuva 16) ja sekvenssianalyyseissä todettiin samoja mikrobiryhmiä kuin vesinäytteissä.



Kuva 16. Mikrobeja Kaasunkehityskokeesta otetun muovinäytteen pinnalla FESEM-mikroskooppilla otetussa kuvassa (kuva: Irina Tsitko).

Hankkeessa tehdyn kirjallisuuskatsauksen mukaan Suomessa keskiaktiivisen jätteen merkittävimmät orgaaniset komponentit ovat veden puhdistukseen käytettävät ioninvaihtohartsit sekä kiinteytykseen käytettävä bitumi. Orgaanista ainesta sisältävä keskiaktiivinen jäte voi hajota mikrobiologisesti, kemiallisesti, säteilyn vaikutuksesta tai sitten kyse voi olla myös usean eri mekanismin yhteisvaikutuksesta. Hajoamisen tuloksena muodostuvat yhdisteet voivat lisätä mikrobiaktiivisuutta, edistää metallien korroosiota ja/tai ne voivat kompleksoitua radionuklidien kanssa lisäten radionuklidien liukoisuutta ja kulkeutumista. Makeri-osahankkeessa tutkittiin bitumin mikrobiologista hajoamista Suomen loppusijoitusolosuhteissa. Bitumi sisältää alifaattisia, aromaattisia ja heterosyklisiä hiilivetyjä, joiden on todettu ainakin tietyissä olosuhteissa olevan mikrobiologisesti hajoavia. Kokeessa käytettiin VLJ-luolan loppusijoitustilasta haettua pohjavettä bitumipalloja sisältävissä pulloissa, joihin lisättiin vedestä rikastettuja sulfaatinpelkistäjiä. Hapettomissa olosuhteissa sulfaatinpelkistäjien on epäilty olevan merkittävä bitumia hajottava mikrobiryhmä, jolloin pohjaveden sisältämä sulfaatti voi toimia elektronin vastaanottajana. Yhden vuoden jälkeen tehdyissä analyyseissä ei havaittu merkittävää bitumin mikrobiologista hajoamista, mutta vuoden pituinen tarkastelujakso on tämän tyyppisessä tutkimuksessa varsin lyhyt.

6.5.2 Ravinteet, energia ja kaasut kalliobiosfäärissä – RENGAS (Hanke 20)

Riikka Kietäväinen, Lasse Ahonen, Nina Heikkinen, Leena Järvinen, Jenni Keränen, Yann Lahaye, Irmeli Mänttari, Arto Pullinen, Lotta Purkamo, Geologian tutkimuskeskus (GTK)

Tutkimusaihe ja keskeiset tulokset

RENGAS-hankkeen (2015–2018) tavoitteena oli tutkia biogeokemiallisesti tärkeiden alkuaineiden reaktioita ja liikkumista kalliopohjavesissä, syvän biosfäärin energialähteitä ja energian siirtymistä mikrobien katalysoimissa hapetus/pelkistysreaktioissa sekä näiden tekijöiden aikaskaaloja ja turvallisuusmerkitystä ydinjätteiden geologisessa loppusijoituksessa. Hanke koostui viidestä osaprojektista: 1) Syväreikä tutkimuksen menetelmät ja infrastruktuurit, 2) Kallioperän suolaisten fluidien viipymäajan ja alkuperän tutkimus, 3) Rikin olomuodot ja biogeokemiallinen merkitys kallioperässä, 4) Hiilen olomuodot ja esiintyminen kiteisessä kallioperässä sekä 5) Loppusijoituksen turvallisuuden biogeokemialliset tekijät. Hankkeen keskeisiä

tuloksia on julkaistu kansainvälisissä julkaisusarjoissa ja sen puitteissa valmistui myös kalliopohjavesien alkuperää ja evoluutiota käsittelevä väitöskirja (Kietäväinen, 2017) sekä kaasujen liukoisuutta käsitellyt Pro Gradu -tutkielma (Heikkinen, 2016). Hankkeessa kehitettiin myös kalliopohjavesien ja kaasujen näytteenotto- ja monitorintimenetelmiä sekä menetelmä rikin isotooppikoostumuksen analysoimiseksi suolaisista vesinäytteistä.

Syvien kalliopohjavesien evoluutiota voidaan kuvata mallilla, joka käsittää meteo-risen veden suotautumisen, veden eristymisen hydrologisesta kierrosta jopa satoja miljoonia vuosia sitten sekä suolaisuuden, kaasukoostumuksen ja veden stabiilien isotooppien kehityksen kivi-vesi vuorovaikutuksen tuloksena. Toisaalta tulokset osoittavat, että kalliopohjavesien geokemialliset ja mikrobiologiset ominaisuudet riippuvat voimakkaasti paikallisista hydrologisista ja litologisista olosuhteista ja ovat kiinteästi kytkeytyneet toisiinsa. Kulkeutumisprosessien osalta keskityttiin erityisesti kaasuihin, joiden osoitettiin esiintyvän kalliopohjavesissä pääosin liuenneina, mutta kaasun erottumista omaksi faasikseen tapahtuu suhteellisen lähellä maan pintaa (<150 m) etenkin metaanirikkaissa pohjavesissä. Metaanirikkaimmilla alueilla yhdestä kairareistä purkautuvan kaasun määrä voi olla jopa kymmeniä tuhansia litroja vuorokaudessa. Kiinteän maan vuoksi-ilmion, eli kallioperän liikunnon kuun ja auringon painovoimakenttien muutosten vaikutuksesta, havaittiin vaikuttavan kallioperästä lähtöisin olevien kaasujen, erityisesti heliumin ja metaanin kulkeutumiseen.

Sulfaatti- ja sulfidifaasien välillä mitattu rikin isotooppien fraktioituminen sopii yhteen sulfaatinpelkistäjäbakteerien aikaansaaman isotooppifraktioitumisen kanssa. Eri kohteiden välillä havaitut erot fraktioitumisen määrässä voivat viitata vaihteluun orgaanisen aineksen hapettamisen ja vedyn käytön suhteen. Termodynaamiset tarkastelut osoittavat, että sulfaattipitoisuuden ollessa rajoittava tekijä, sulfidin poistuminen joko hapettumalla tai saostumalla suosii metaania elektroninluovuttajana vetyyn verrattuna.

Hiilivetyjä, etenkin metaania, muodostuu kallioperässä in situ sekä mikrobiologisissa että geokemiallisissa (abioottisissa) prosesseissa. Metaanin esiintymisen havaittiin liittyvän erityisesti grafiittipitoisiin metasedimentteihin, ja grafiitin todettiin olevan myös termodynaamisesti todennäköinen metaanin hiilenlähde. ¹³C-rikkaan, mahdollisesti abioottisen metaanin osuuden todettiin kasvavan syvemmälle (>1,5 km) mentäessä, sekä graniittisissa ja vulkaniittisissa kivilajiympäristöissä, mutta mikrobiologinen metaaninmuodostus on mahdollista ainakin 2,2 km

syvyydellä joko hydrogenotrofisesti, asetiklastisesti tai metyloτροφisesti. Metaanin hapetus on merkittävintä alle 1 km syvyydellä. Epäorgaanisen hiilen lähteet ovat pitoisuuksiltaan pieniä, mutta mikäli hiilidioksidia tulee systeemiin lisää, aktivoi se mikrobeja erityisesti pitkällä aikavälillä mahdollistaen metanogeenisten mikrobien aktivoitumisen ja hiilen spesiaation muutoksen karbonaattisesta hiilestä hiilivedyksi. Myös asetaatti voi toimia merkittävänä hiilen, ja mahdollisesti myös energian lähteenä kalliobiosfäärissä ja se on osoittautunut keskeiseksi rikin- ja hiilenkiertoja linkittäväksi yhdisteeksi.

Tulosten merkitys, hyödynnettävyys, yhteydet muuhun tutkimukseen

RENGAS-hankkeessa tarkastellut biogeokemialliset reaktiot ja saadut tulokset liittyvät ennen kaikkea radioaktiivisten tai korrodoivien yhdisteiden ja alkuaineiden vapautumiseen ja kulkeutumiseen kallioperä-pohjavesisysteemeissä, joka muodostaa käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituslaitoksen uloimman, luonnollisen vapautumisesteen. Erityisesti kaasun muodostuksen ja kulkeutumisen osalta tulokset ovat soveltaen hyödynnettävissä myös matala- ja keskiaktiivisen jätteen loppusijoituksen turvallisuustarkastelussa.

Ymmärrys kalliopohjavesiympäristön aikaskaaloista on välttämätöntä muutosten ennustamiseksi. Kymmenien ja satojen miljoonien vuosien viipymäajat kertovat toisaalta systeemin eristyneisyydestä ja reaktioiden hitaudesta, mutta toisaalta tulokset osoittavat, että kalliobiosfääri voi reagoida nopeasti esim. loppusijoituslaitoksen rakentamisen aiheuttamiin muutoksiin. Pitkä viipymäaika on myös mahdollistanut huomattavien metaanipitoisuuksien kertymisen pohjavesiin. Hiilen mobilisoituminen voi vaikuttaa loppusijoituksen turvallisuuteen mm. muuttamalla paineolosuhteita, mahdollistamalla 14C:n kulkeutumisen ulos loppusijoitustilasta ja tarjoamalla mikrobeille energianlähteitä. Metaanin isotooppikoostumuksen ja eri mikrobiyhteisöjen välillä ei havaittu selvää yhteyttä, mikä korostaa tarvetta käyttää eri tutkimusmenetelmiä ja monitieteistä lähestymistapaa kokonaiskuvan saavuttamiseksi. Rikkiyhdisteiden merkitys loppusijoitustilassa liittyy etenkin sulfidin aiheuttamaan metallien korroosioon ja bentoniitin puskuriominaisuuksiin mahdollisesti vaikuttavien sulfidimineraalien muodostukseen. Mikrobiologisen sulfaatinpelkistyksen rooli sulfidin muodostuksessa on merkittävä. Hankkeessa käytetyt menetelmät mahdollistavat reaktioita kontrolloivien tekijöiden kuten liukoisuuden, hapetus-pelkistysolojen ja elektronien luovuttajien ja vastaanottajien saatavuuden tarkastelun pitkäaikaisturvallisuuden riskinarvioinnin tueksi.

Hankkeessa kehitetyt menetelmät sekä näiden vertailusta saadut tulokset ovat hyödynnettävissä loppusijoituskohteiden valintaan ja paikkatutkimuksiin liittyvissä kalliopohjavesitutkimuksissa sekä saatujen tulosten virhelähteiden arvioinnissa. Tulosten perusteella mm. suositellaan kaasunäytteiden ottamista paineellisin menetelmin. Kiinteän maan vuoksi-ilmiössä nähdään mahdollisuuksia vapautumisesteiden ja kallioperän rikkonaisuusmuutosten tarkkailuun. Tutkimuksen tuloksia hyödynnetään myös tulevissa KYT- ja EURAD-ohjelmissa.

Tutkimuksen toteutus käsitti verkostoitumista ja yhteistyötä useiden tutkimuslaitosten ja yliopistojen kanssa. VTT:n KYT2018-ohjelman mikrobiologia-hankkeiden kanssa käytiin tiivistä vuoropuhelua hankkeen kaikissa vaiheissa, ja yhteistyö käsitti myös näytteenottoa. Keskeisimpiä kansainvälisiä yhteistyötahoja olivat jalka-kaasuanalyysien osalta GFZ Potsdam, kaasuvuon mittauksessa INGV Rooma sekä International Continental Scientific Drilling Program (ICDP).

Tutkimusmenetelmät

RENGAS-hankkeen rungon muodostivat kiteisen kallioperän syvissä kairareijissä tehdyt vesi- ja kaasunäytteenotot sekä monitoroinnit. Metaanivuota mitattiin Outokummun ja Juuan alueella käyttäen kaasunkeräyskammioon yhdistettyä TDLAS+IR-laitteistoa ja kaasuvuon ajallisia koostumusmuutoksia seurattiin Outokummun syväreiän suulta purkautuvasta kaasusta käyttäen kvadrupolimassaspektrometria. Kaasukoostumuksen ajallista vaihtelua verrattiin vedenpinnan tason ja ilmakehän paineen muutoksiin sekä laskennallisesti määritettyyn kiinteän maan vuoksen voimakkuuteen. Letkuprofiilinäytteenottoa tehtiin Porissa (440 m syvyyteen), Outokummun syväreiällä (2100 m syvyyteen) sekä Åressa (2500 m syvyyteen) ja Outokummun syväreiällä toteutettiin pumppausnäytteenotot 1000 m ja 1500 m syvyyksiltä. Lisäksi näytteitä otettiin suoraan paineellisten, tulpattujen kairareikien suulta Pyhäsalmen kaivoksen 1430 m tasolta. Åren, Outokummun sekä Pyhäsalmen näytteenottoihin sisältyi geokemiallisten näytteiden lisäksi myös mikrobiologista näytteenottoa yhteistyökumppaneille (VTT, Lawrence Berkeley National Laboratory ja Uni. St Andrews). Hankkeessa hyödynnettiin myös aiemman KYT2014-ohjelman SALAMI-hankkeessa kerättyä aineistoa.

Näytteistä määritettiin kentällä pH, alkaliteetti ja sähkönjohtavuus (EC). Laboratoriossa (Labtium, Eurofins Environment Testing ja Isotech Laboratories) analysoitiin veden kemiallinen koostumus (kationit ja anionit, mukaan lukien sulfidipitoisuus) ja

kaasukoostumus. Hapetus-pelkistyspotentialiaali, alkaliteetin koostumus sekä ionien aktiivisuudet määritettiin analyysituloksista käyttäen PHREEQC-ohjelmistoa ja wateq4f-tietokantaa (USGS). Outokummun letkunäytteistä määritettiin lisäksi ase-taattipitoisuus ionikromatografisesti (TVO Nuclear Services) ja Pyhäsalmen näyt-teistä jalokaasujen isotooppikoostumus massaspektrometrisesti (GFZ Potsdam). Joistakin kaasunäytteistä määritettiin myös hiilivetyjen (metaani, etaani) isotooppi-koostumus (Isotech Laboratories). Veden stabiilit isotoopit määritettiin GTK:lla käyt-täen ontelovaimenemisspektroskopiaa (CRDS) ja rikin isotoopit korkearesoluutioi-sella MC-ICP-MS -laitteistolla. Hankkeessa myös testattiin ja kehitettiin rikin erotus-menetelmiä suolaisille pohjavesille. Termodynaamiset tarkastelut tehtiin laskennal-lisesti käyttäen vesi- ja kaasunäytteistä määritettyjä pitoisuuksia, pH:ta, alkaliteettia sekä in situ -lämpötilaa, joiden avulla määritettiin keskeisten biogeokemiallisten, hiilen ja rikin kiertoihin liittyvien reaktioiden Gibbsin energiat sekä energiatiheys.

6.6 Muut turvallisuustutkimukset

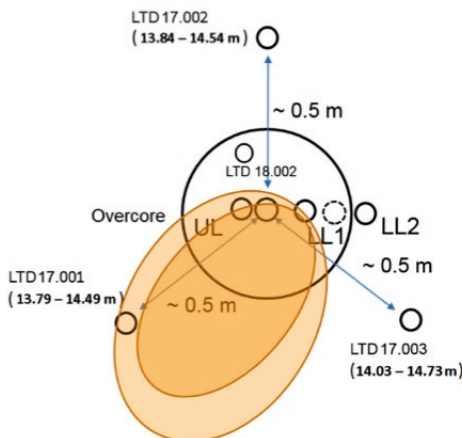
6.6.1 Radionuklidien kulkeutuminen kallioperässä – Kallion in-situ tutkimukset – RAKU (Hanke 21)

Marja Siitari-Kauppi, Eveliina Muuri, Mikko Voutilainen, Jussi Ikonen
Kemian laitos, Helsingin yliopisto

Helsingin yliopiston Kemian laitoksella suoritettussa hankkeessa on tutkittu radio-nuklidien pidättymistä ydinpolttoaineen loppusijoitustilaa ympäröivään perus-kallioon. Hankkeen keskeisenä tavoitteena on ollut arvioida radionuklidien kulkeu-tumisominaisuuksia peruskalliossa in-situ olosuhteissa verrattuna laboratorio-olosuhteisiin, joissa kulkeutumisominaisuuksia yleensä määritetään turvallisuus-analyysin lähtötiedoiksi. Hankkeen tavoitteena oli myös yhdistää kemiallinen pidättyminen matriisidiffusioon. Tulosten tulkintaan kehitettiin reaktiivinen kul-keutumismalli, joka ottaa huomioon kivimatriisin rakenteen ja mineraalien hetero-geenisuuden. Lisäksi hankkeen tarkoituksena on ollut vähentää turvallisuusanalyyy-sissä käytettävien radionuklidien pidättymisparametrien epävarmuuksia. Hanke on kytkeytynyt tiiviisti kansainvälisen Grimsel Test Site (GTS) – Phase VI puiteohjelman Long Term Diffusion (LTD)-projektiin.

KYT2014-ohjelmakauden aikana aloitettua reaktiivisen kulkeutumismallin kehittämistä jatkettiin ja TRDW – malli julkaistiin liittyen kesiumin kulkeutumiseen Grimselin granodioriitissa (Voutilainen et al. 2017). KYT2018-kaudella raportoitiiin lisäksi ensimmäinen in-situ koe (Ikonen et al. 2016a, 2016b, 2017) ja jatkettiin toista in-situ koetta (LTD Monopole2) Grimselin vuorilaboratoriossa Sveitsissä. In-situ kokeessa merkkiaineina käytettiin tritioitua vettä (HTO), Cl-36, Na-22, Cs-134, Ba-133 ja stabiilia seleeniä. Kokeessa mitattiin merkkiaineiden pitoisuuden muutoksia: syöttöreiästä seurattiin merkkiaineiden pitoisuuden vähenemää ja seurantareistä pitoisuuden kasvua. Syöttöreiästä saatiin välitöntä tietoa aineiden pidättymisestä sekä kulkeutumisesta ja seurantareistä mitattiin kohonneita tritoidun veden pitoisuuksia noin puolen vuoden kuluttua kokeen aloittamisesta.

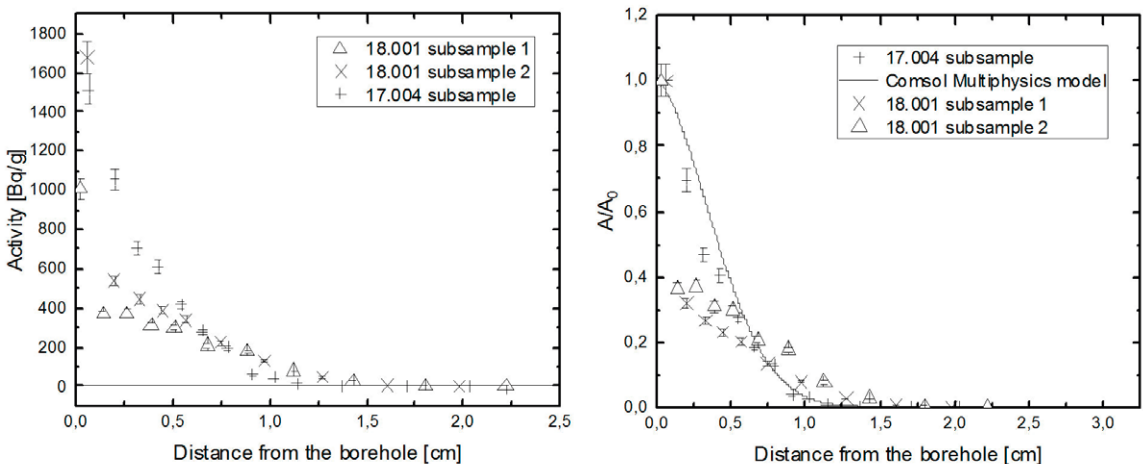
In-situ koe lopetettiin kesällä 2017 yli kolmen vuoden seurannan jälkeen. Koealue kairattiin ja lisäksi alueelta kairattiin kolme kaukonäytettä noin 50 cm:n päästä syöttöreiästä. Osa kairansydämistä lähetettiin Helsingin yliopistoon analysoitavaksi KYT2018-hankkeen puitteissa. Pidättymättömät nuklidit (HTO ja Cl-36) ja stabiili seleeni määritettiin näytteistä ulosuuttomenetelmällä. Tritiumia ja klooria havaittiin selkeästi mitattavat määrät kaukokairanäytteissä, joten tritium oli kulkeutunut kokeen aikana yli 50 cm:n päähän syöttöreiästä. Tämä tarkoittaa, että kiven johtava huokoisuus on jatkuva ainakin tässä mittakaavassa. Kaukokairanäytteissä nähtiin myös selkeä suuntautuneisuuden vaikutus ulosuuttotuloksissa, minkä perusteella tehtiin arvio pidättymättömien radionuklidien kulkeutumissuunnasta kivessä (kuva 17). Seleeniä ei havaittu tutkituissa kivissä.



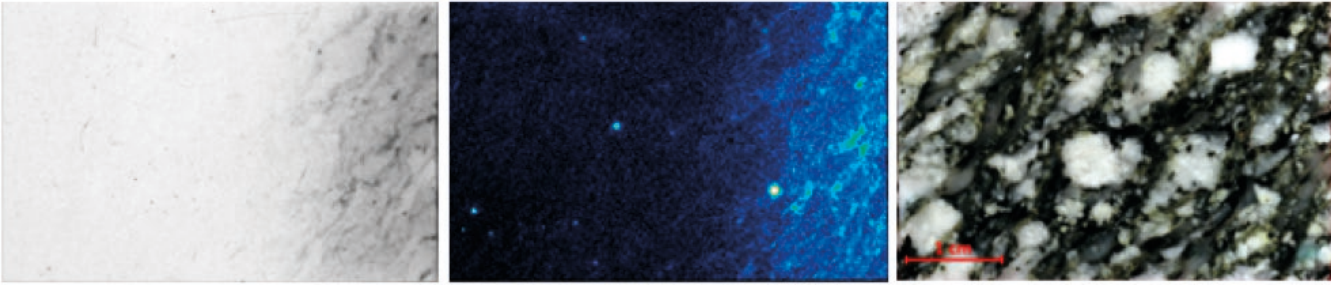
Kuva 17. Tritoidun veden kulkeutuminen LTD Monopole2 in-situ kokeessa kolmen ja puolen vuoden kuluessa perustuen kairansydännäytteiden tuloksiin ulosuuttomenetelmällä.

Pidätyvät radionuklidit (Ba-133, Cs-134 ja Na-22) määritettiin syöttöreiän läheltä kairatuista näytteistä gammaspektrometrialla ja autoradiografiamenetelmillä. Analyysissä havaittiin, että suurin osa kemiallisesti pidätyvistä nuklideista löytyi noin sentin päässä syöttöreiästä kivimatriisissa (kuva 18). Autoradiografiamenetelmillä huomattiin lisäksi, että kiven suuntautuneisuudella, joka on sidottu biotiitin ja tummien mineraalien esiintymiseen kivessä, on vahva merkitys myös pidätyvien nuklidien tuloksiin (kuva 19).

In-situ kokeen aikana huomattiin, että barium pidätyi kiveen enemmän kuin alun perin ajateltiin, minkä vuoksi bariumin pidätymisominaisuuksia tutkittiin tarkemmin tämän hankkeen puitteissa myös laboratorioissa (Muuri et al. 2017, 2018a). Bariumin sorptiota tutkittiin laboratorioissa eräsorptiokokeilla ja ohuthiesorptiokokeilla. Kokeissa huomattiin, että barium on etenkin biotiittiin vahvasti pidätyvä ja että laboratoriosorptiokokeiden tulokset yliarvioivat radionuklidien sorptiota in-situ -olosuhteisiin verrattuna. Ba-133:lle laboratorioissa määritetty jakaantumiskerroin on $0.184 \text{ m}^3/\text{kg}$, kun taas in-situ kokeen COMSOL Multiphysics mallinnustulosten perusteella arvoksi saadaan $0.009 \text{ m}^3/\text{kg}$. Bariumin sorptiomekanismeja biotiittiin arvioitiin molekyyylimallinnuksella, ja huomattiin, että barium kiinnittyy biotiitin mineraalipinnoille ioninvaihdolla. Bariumin sorptiotuloksia mallinnettiin Phreeqc-mallinnusohjelmalla ioninvaihtomallilla.



Kuva 18. Ba-133:n diffuusioprofiilit Grimselin kivessä in-situ kokeen jälkeen. Oikealla on kokeellisiin tuloksiin sovitettu diffuusiomalli COMSOL Multiphysics -ohjelmalla (efektiivinen diffuusiokerroin $1.8 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, jakaantumiskerroin $0.009 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ ja huokoisuus 0.7 %).



Kuva 19. Filmiautoradiogrammi (vasen), elektroninen autoradiogrammi (keskellä) sekä skannattu kivipinta (oikea) osoittavat Ba-133:n esiintymisen kivessä (kuvien oikea reuna syöttöreiän pinta). Filmiautoradiogrammeissa tummimmat alueet ja elektronisissa autoradiogrammeissa vaaleimmat alueet ovat aktiivisimpia. Kiven suuntautuneisuuden vaikutus pidätyvien nuklidien kulkeutumiseen näkyy autoradiogrammeissa selkeästi.

Myös bariumin diffuusiota tutkittiin erilaisilla laboratoriokokeilla ja tulokset mallinnettiin COMSOL Multiphysics -ohjelmalla (Muuri et al. 2018b). Laboratoriodiffuusio- kokeiden tulokset olivat hyvin samankaltaiset in-situ diffuusio- kokeen tulosten kanssa. Jotta voitiin tarkastella bariumin tunkeutumisvyvyyttä sekä spatiaalista jakautumista eri mineraaleihin, hankkeessa kehitettiin elektronista autoradiografiamenetelmää (kuva 19). Menetelmällä määritetään suoraan näytteen pinnasta radioaktiivisuuden jakauma kvantitatiivisesti hyödyntäen MPGD-teknologiaa (Micro Pattern Gas Detector, paikkaherkkä kaasuilmaisoin, BeaQuant®). Hankkeessa kehitettyjä laboratorio- ja mallinnusmenetelmiä käytettiin in-situ näytteiden ja tulosten analysointiin.

6.6.2 C-14 Vapautuminen Metallijätteestä – HILLI-14 (Hanke 22)

Tiina Heikola, Kaija Ollila, Tiina Lavonen, Kirsti Helosuo, VTT

Hankkeen tavoitteena on ollut selvittää voimalaitos- ja käytöstäpoistojätteen aktiivisissa metallikomponenteissa olevan ^{14}C isotoopin vapautumista pohjaveteen loppusijoitusolosuhteissa, vapautumisnopeutta sekä veteen muodostuvien liuenneiden ja kaasumaisten hiiliyhdisteiden kemiallisia olomuotoja. Hiilen kulkeutumisen kannalta erityisen tärkeää on jakautuminen orgaanisiin ja epäorgaanisiin olomuotoihin. Hanke oli myös osa EU-projektia: CAST (CARbon-14 Source Term, WP: Steels), joka alkoi jo vuonna 2013 ja päättyi alkuvuonna 2018. Lisäksi se oli jatkumoa edellisessä KY2014 ohjelmassa olleelle 'C-14 vapautuminen loppusijoituksessa', HILLI-14 -projektille.

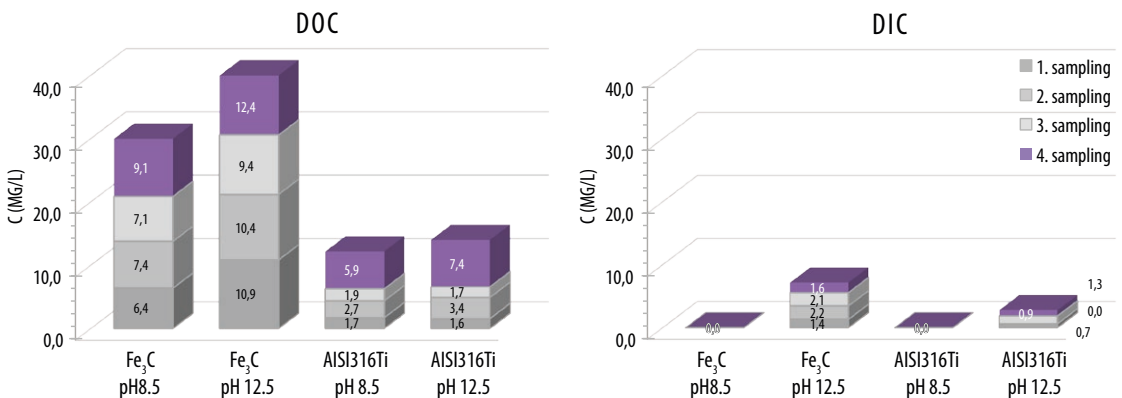
Tarkkaa tietoa ^{14}C :n kemiallisesta olomuodosta säteilytetyssä teräsmateriaalissa ei ole, mutta tuestä muodostuneen ^{14}C :n arvellaan olevan karbidimuodossa, jos se alkuperäisessä rakenteessa on ollut nitridinä (Johnson ja Schwyn 2004). Tämän johdosta tutkimukset aloitettiin inaktiivisilla teräs- ja karbidijauhenäytteillä, jonka avulla haluttiin selvittää, onko hiilen alkuperäisellä muodolla merkitystä siihen, missä muodossa se vapautuu. Materiaaleiksi valikoitui aiemman HILLI-14 -projektin kokemusten pohjalta, VTT:llä valmistettu teräsjauhe, modifioitu AISI316Ti, sekä kaupallinen rautakarbidijauhe. Molempien materiaalien mikrorakenne ja koostumus varmistettiin ennen kokeiden aloitusta (optinen mikroskooppi, SEM/EDS, XRD, OES). Loviisan pohjavesinäytteen pohjalta mallinnettiin eluutioliuokset, joita kokeessa käytettiin. Toinen voimakkaasti alkalinen pH 12,5 (CA125), joka simuloi loppusijoitustilassa käytetyn sementin vaikutusta ja toinen lievästi alkalinen pH 8,5 referenssinä (CA85).

Batch-tyyppiset eluutiokokeet, joissa tutkittiin liuosfaasiin vapautuvaa hiiltä käynnistettiin Schott:n lasipulloissa hapettomissa olosuhteissa (Ar) hanskakaapissa. Vastaavasti kaasufaasianalyysia varten käynnistettiin kokeet septum-korkillisissa lasiastioissa. Astioista otettiin näytteen suunnitelmien mukaan analyysia varten. Liuosfaasiin vapautuneen epäorgaanisen ja orgaanisen hiilen kokonaispitoisuudet määritettiin ns. TIC/TOC -analysaattorilla (Analytika Jena N/C UV HS). Tulokset on esitetty kuvassa 20. Tulosten perusteella voidaan sanoa, että hiili vapautuu molemmista materiaaleista pääasiassa orgaanisessa muodossa liuosfaasiin. Vuorinen (2012) mukaan hiilen esiintyminen karbidimuodossa metallirakenteessa lisää orgaanisen hiilen osuutta erityisesti korkeassa pH:ssa. Alkuperäisessä teräsjauhemateriaalissa, modifioitu AISI316Ti, oli huomattavasti pienempi hiilipitoisuus, mutta suhteellisesti siitä vapautui enemmän hiiltä liuosfaasiin verrattuna rautakarbidijauheeseen. Kokonaishiilipitoisuuden lisäksi pyrittiin selvittämään myös orgaanisten yhdisteiden spesiaatiota mm. erilaisin kaasuihin ja nestekromatografiamenetelmin sekä elektroforeesin avulla. Rautakarbidinäytteissä havaittiin pieniä alkoholimolekyyliä (metanoli, etanoli, 1-propanoli), mutta pitoisuudet olivat lähellä määrittämissä rajoja. Teräsnäytteissä pitoisuudet jäivät alle määrittämissä rajoja. Kaasufaasianalyysit suoritettiin yhteistyössä Helsingin yliopiston radiokemian laitoksen kanssa. Tämän lisäksi tehtiin vielä tarkentavia mittauksia VTT:llä. Analyysit paljastivat, että ainoastaan Fe_3C -näytteistä vapautui hiiliyhdisteitä. Kaasua näytti vapautuvan jopa siinä määrin, että näyteastioiden sisälle muodostui ylipaine kokeen aikana. Näytteistä tunnistettiin hiilen orgaanisina yhdisteinä, mm. metaania, etaania, propaania ja butaania (100–900 ppm).

Epäorgaanisessa muodossa hiili esiintyi CO:na, jota havaittiin 1000–1900 ppm pitoisuuksina.

Säteilytetyn teräksen eluutiokokeet käynnistettiin kesäkuussa 2016 alipaineisessa hanskakaapissa hapettomissa olosuhteissa. Näytteet (2 kpl) sahattiin Loviisan ydinreaktorin säteilytysketjun kapselin kuorimateriaalista VTT:llä kuumakammiossa. Näytteiden teoreettiseksi ^{14}C :n maksimipitoisuudeksi laskettiin materiaalin koostumuksen ja säteilytyshistorian perusteella 2 kBq ^{14}C /g. Tarkemmat tiedot näytteistä ja koejärjestelystä esitetty taulukossa 6. Ensimmäiset näytteet otettiin 133 päivän kuluttua kokeen aloituksesta. Liuosnäytteiden kokonaisaktiivisuudet määritettiin nestetuikelaskurilla sekä gammaspektrometrillä ilman esikäsittelyjä. Mittausten yhteydessä liuoksissa havaittiin olevan sakkaa. Ilman kemiallista erottelua on mahdotonta tunnistaa yksittäisiä radionuklideja. Liuoksista määritetyt aktiivisuudet on esitetty taulukossa 7. Selkeästi korkeammat aktiivisuudet havaittiin matalamman pH:n liuoksessa. Tulokset seuraavasta näytteenotosta ja -käsittelystä ovat tätä tiivistelmää kirjoitettaessa vielä keskeneräisiä, mutta valmistuvat alkuvuonna 2019.

Säteilytetyn teräksen kokeita ei pystytty suorittamaan alkuperäisen hankesuunnitelman mukaan. Muutto uuteen ydinturvallisuustaloon hidasti töiden etenemisen ja esti näytteiden oton useaksi kuukaudeksi, lähes vuodeksi.



Kuva 20. Liuosfaasiin vapautuneen hiilen pitoisuudet (DOC = orgaanisessa muodossa, DIC = epäorgaanisessa muodossa, karbonaattina).

Taulukko 6. Näytetiedot ja koejärjestely säteilytetyille näytteille.

	Näyte 1	Näyte 2
Aktiivisuus (MBq ⁶⁰ Co)	227,27	619,23
Massa (g)	2,975	9,211
Eluutioliuos / tilavuus	CA85 / 120 mL	0,01M NaOH / 120 mL
Näytteenotto	Nestefaasi	

Taulukko 7. Liuosnäytteiden mitatut aktiivisuudet.

Bq/g	⁶³ Ni/ ¹⁴ C ?	⁵⁵ Fe	⁵⁴ Mn	⁵⁸ Co	⁶⁰ Co	¹²⁵ Sb	¹²⁴ Sb	^{110m} Ag
Näyte 1	131,9	1053,1	23,0	2,2	328,9	16,0	4,9	
Näyte 2	4,6	11,1	0,4		1,2	2,0	0,7	0,4

Lähteet

JOHNSON L and SCHWYN B. 2004. Behaviour of ¹⁴C in the safety assessment of a repository for spent fuel, high-level waste and long-lived intermediate level waste in Opalinus Clay. In: Johnson LH and Schwyn B (eds). Proceedings of a workshop on the release and transport of C-14 in repository environments. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle NAGRA Interner Bericht 04-03.

VUORINEN, U. 2012. ¹⁴C in irradiated metallic waste – Literature survey. VTT Research report, VTT-R-05446-12 (in Finnish).

6.6.3 Rakovirtaus-, matriisidiffuusio- ja sorptiomallinnus hila-Boltzmann menetelmällä – JYFLKYT (Hanke 23)

Keijo Mattila, Jukka Kuva, Jyväskylän yliopisto

Tässä hankkeessa tutkitaan radionuklidien kulkeutumisesta kallioperän vettä johtavassa raossa ja sitä ympäröivässä kivimatriisissa. Hankkeessa keskitytään laskennalliseen mallinnukseen, eli kulkeutumista tutkitaan tietokonesimulaatioiden avulla.

Motivaatio

Suomessa korkea-aktiivinen käytetty ydinpolttoaine on suunniteltu loppusijoitettavan syvälle kiteiseen kallioperään, joten kallioperän ilmiöiden tunteminen muodostaa pohjan loppusijoituksen turvallisuuden arvioimiselle. Tällaisen loppusijoituspaikan turvallisuuteen liittyy mm. kallioperän kyky viivästyttää pohjaveteen

mahdollisesti joutuneiden radioaktiivisten aineiden kulkeutumista. Koska pohjaveden kulkeutumisreitteihin ja kallioperän ominaisuuksiin liittyy vielä epävarmuustekijöitä, geosfäärin roolia radionuklidien pidättämisessä on tietoisesti aliarvioitu nykyisissä turvallisuusanalyysissä. Kiviaineksen huokostilavuuteen ja heterogeenisuuteen liittyvät epävarmuudet ovat johtaneet myös muutoksiin radionuklidien kulkeutumisen mallinnusperiaatteissa.

Tausta

Kallioperässä radionuklidien kulkeutuminen tapahtuu pääasiassa vettä johtavissa raoissa ja ruhjevyyhykkeissä, joissa niiden kulkeutuminen voi hidastua matriisidiffuusion ja sorption vaikutuksesta. Matriisidiffuusio on prosessi, jossa radionuklidit diffundoituvat kulkeutumisreitien seinämissä olevaan huokoiseen kiviainekseen ja palaavat mahdollisesti virtaukseen vasta satunnaisen diffundoitumisajan jälkeen.

Sorptioksi puolestaan kutsutaan kemiallista prosessia, jonka ansiosta radionuklidit voivat kiinnittyä kemiallisesti (sorboitua) kulkeutumisreiteillä sijaitsevien mineraalien pinoille. Nämä mineraalit voivat sijaita joko raon seinämillä tai sisällä huokoisessa kiviaineksessa, jonne nuklidit ovat kulkeutuneet diffundoitumalla. Näiden ilmiöiden uskotaan olevan merkittäviä viivästystekijöitä kiteisessä kallioperässä esiintyvissä virtauksissa. Viivästyksen merkittävyyteen käytännössä vaikuttavat, etenkin vettä johtavien rakojen reuna-alueiden läheisyydessä, käytettävissä oleva kallioperän huokostilavuus, sorptiokapasiteetti ja spesifinen pinta-ala sekä kyseessä oleva radionuklidi. Nämä ominaisuudet vaihtelevat suuresti kiven sisältämien mineraalien välillä ja tästä syystä materiaalin heterogeeniset ominaisuudet on tyypillisesti otettava huomioon.

Laskennallinen mallinnus

Radionuklidien kulkeutumiseen liittyvien ilmiöiden laskennalliseen mallintamiseen on viime vuosina kehitetty uusia menetelmiä. Yksi näistä on hila-Boltzmann (HB) simulointimenetelmä, joka perustuu diskreetin Boltzmannin yhtälön ratkaisemiseen. Menetelmä pohjautuu statistiseen mekaniikkaan ja kineettiseen teoriaan, jonka ansiosta monien mikroskooppisten mekanismien huomioiminen mallinnuksessa onnistuu luontevasti. Lisäksi menetelmän etuna on sen numeerinen tehokkuus, erityisesti rinnakkaislaskennassa, ja helppo sovellettavuus monimutkaisissa rakenteissa (kuten huokoisissa materiaaleissa). Menetelmä soveltuu erityisesti virtausten, mutta myös diffuusion ja sorption simuloimiseen.

Toinen tehokkaaksi todettu menetelmä, jolla voidaan simuloida radionuklidien kulkeutumista, on Time-Domain Random Walk (TDRW) menetelmä, joka perustuu merkkipartikkelien satunnais-kulkeutumiseen ja tilastolliseen käyttäytymiseen. Menetelmä soveltuu erinomaisesti rinnakkais-laskentaan ja mahdollistaa monien fysikaalisten ja kemiallisten ilmiöiden mallinnuksen, mukaan lukien diffuusio ja sorptio. Menetelmän heikkoutena on ollut, että sillä ei ole pystytty ottamaan huomioon virtauksen aiheuttamaa kulkeutumista, eikä se siksi ole sellaisenaan soveltunut rakovirtauksien simulointiin.

Tulokset

Tämän hankkeen kahden ensimmäisen vuoden aikana TDRW menetelmää on kehitetty edelleen ja nyt menetelmällä on mahdollista simuloida virtauksen mukana kulkevan merkkiaineen kulkeutumista tunnetussa virtauskentässä.

Lisäksi, hankkeessa rakennettiin rinnakkaislaskentaan tukeutuva ja suurteho-laskentaan kykenevä simulointityökalu, joka mahdollistaa laskennallisen mallinnuksen esim. Tieteen tietotekniikan keskuksen (CSC) supertietokoneita käyttäen.

Simulointityökalu hyödyntää samanaikaisesti sekä HB- että TDRW-menetelmää. HB-menetelmällä huolehditaan rakovirtauksen mallintamisesta ja TDRW-menetelmällä mallinnetaan radionuklidien advektiota, diffuusiota ja sorptiota. Hybridimenetelmä hyödyntää molempien menetelmien parhaat puolet: HB-menetelmä on vakiinnuttanut asemansa yhtenä tehokkaimmista työkaluista huokoisen aineen virtaussimulaatioihin ja TDRW-menetelmä puolestaan kykenee mallintamaan kulkeutumista erittäin heterogeenisissa materiaaleissa silloinkin, kun mallinnus perinteisemmillä menetelmillä on hankalaa tai jopa mahdotonta (esim. kun materiaali-parametrit ovat epäjatkuvia tai vaihtelevat suuresti).

Tehty menetelmäkehitys ja toteutettu simulointityökalu mahdollistavat radionuklidien kulkeutumisen laskennallisen mallintamisen realistisessa vettä johtavassa raossa ja sen ympärillä olevassa heterogeenisessa kivimatriisissa. Tällaista mallinnusta voidaan käyttää esim. relevantteja migraatioskenaarioita arvioitaessa.

Lisäksi, realistisen rakogeometrian, mineraali- ja huokoisuusrakenteen sekä mineraalien kemiallisten ominaisuuksien yhdistäminen diffuusiomallinnukseen edistää kulkeutumista mittaavien laboratoriokokeiden tulosten tulkintaa sekä

yleisemminkin kulkeutumiskonseptien arviointia. Mallinnuksen avulla voidaan myös lisätä ymmärrystä siitä, kuinka luonnonraoissa tapahtuva kulkeutuminen eroaa usein mallinnuksessa käytetyistä yksinkertaistetuista tapauksista.

Hankkeesta saatava tieto edistää omalta osaltaan viranomaisen pitkäaikaisturvallisuuden arviointivalmiuksia ja hyödyttää loppusijoitushankkeiden toimijoita.

6.6.4 Hiilen Sorptio ja Kemialliset Muodot Kallioperässä – C14ROCK (Hanke 24)

Merja Lusa, Jukka Lehto, Janne Lempinen, Helsingin yliopisto

1. Tutkimusaihe ja merkitys ydinjätehuoltotutkimuksessa

C14ROCK-projektissa selvitettiin ydinpolttoaineesta peräisin olevan radiohiilen (^{14}C) pidättymistä kallioperässä sekä sen kemiallisia muotoja ja näiden muutoksia radiohiilen kulkeutuessa polttoaineesta kallioperän kautta pintabiosfääriin. Radiohiiltä muodostuu ydinpolttoaineessa sekä sitä ympäröivissä metallirakenteissa neutronien aktivoitessa tyypeä reaktiolla $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$. Radiohiiltä on polttoaineessa, Zircaloy-polttoainekuoreissa sekä teräsrakenteissa kussakin suurin piirtein yhtä paljon. Radiohiilen kemiallisia muotoja polttoaineessa ja metallirakenteissa ei tunneta, mutta hiilen oletetaan esiintyvän pääasiassa niukkaliukoisina karbideina tai grafiittina. Nämä niukkaliukoiset muodot voivat kuitenkin hapettua liukoisemmiksi muodoiksi, kuten hiilidioksidiksi (CO_2), esim. säteilyn aiheuttaman radiolyysin seurauksena. Kemiallinen muoto (spesiaatio) vaikuttaa voimakkaasti radionuklidien kulkeutumiseen ja pidättymiseen ympäristössä, mutta aikaisempi tietämys radiohiilen käyttäytymisestä syvän kallioperän anaerobisessa ympäristössä on hyvin rajallista. ^{14}C kuuluu ydinjätteen loppusijoituksen biosfääriturvallisuusanalyysissä tärkeimpään prioriteettiluokkaan ^{36}Cl :n ja ^{129}I :n ohella. Tähän prioriteettiluokkaan kuuluvien nuklidien arvioidaan aiheuttavan suurimman osan mahdollisesta ydinjätteen loppusijoituksesta tulevaisuudessa ihmisille aiheutuvasta säteilyannoksesta. Verrattuna muiden tärkeimmän prioriteettiluokan (^{36}Cl , ^{129}I) sekä alempien prioriteettiluokkien radionuklidien tutkimukseen, radiohiilen käyttäytymisen tutkimus on ollut niin Suomessa kuin muuallakin maailmassa erittäin vähäistä. Ydinjätteen loppusijoituksen turvallisuusanalyysissä suurin epävarmuus liittyy kuitenkin eritoten radiohiilen spesiaatioon ja siihen vaikuttaviin biologisiin (bioottisiin, esim. mikrobiologia) ja kemiallisiin (abioottisiin) tekijöihin. Tästä johtuen radiohiili oletetaan ydinjätteen

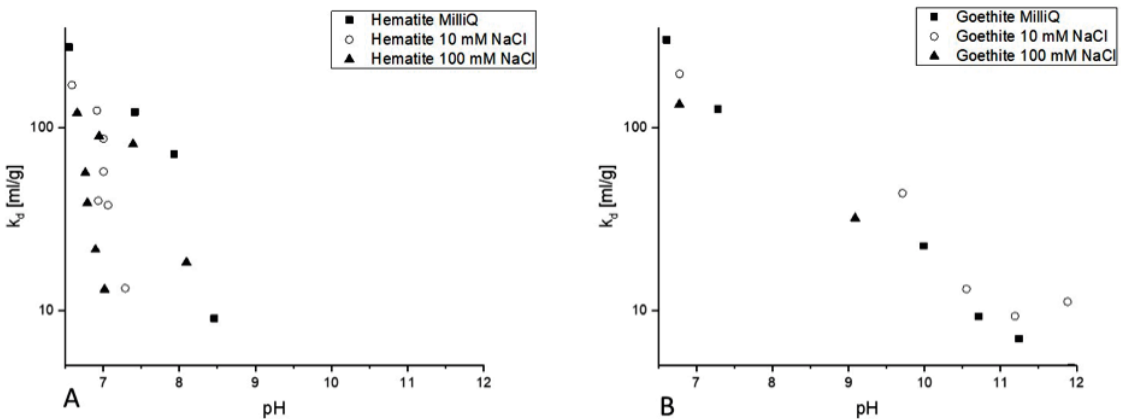
loppusijoituksen turvallisuusanalyysissä konservatiivisesti ei-pidättyväksi nuklidiksi ja sen arvioidaan kulkeutuvan kallioperässä pohjaveden virtausnopeudella. Siten radiohiilen mahdolliseen pidättymiseen ja spesiaation muutoksiin vaikuttavien tekijöiden tutkimus on erittäin tärkeää. Tässä hankkeessa esitetyn kaltaista tutkimusta Suomessa ei ole aiemmin tehty ja hankkeessa esitetyn kaltaista tietoa ei ole saatavilla myöskään kansainvälisesti.

C14ROCK-projektin ensimmäisessä vaiheessa selvitettiin karbonaattimuotoisen radiohiilen (HCO_3^-) pidättymistä (sorptiota) syvän kallioperän mineraalipinnoille. Tässä yhteydessä tutkittiin sekä radiohiili-kalsiitti isotooppivaihtoa, että ^{14}C -karbonaatin sorptiota rautahydroksideihin (götiitti ($\alpha\text{-FeOOH}$), hematiitti ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) ja magnetiitti (Fe_3O_4)). Toisessa vaiheessa tutkittiin erityisesti anaerobisten sulfaattia pelkistävien bakteerien (SRB) vaikutuksia radiohiilen pidättymiseen sekä spesiaation muutoksiin metaanin (CH_4) ja karbonaatin välillä. Näitä SRB bakteereita esiintyy erityisesti syvän kallioperän sulfaatti- ja metaanipitoisella vyöhykkeellä noin 250–350 metrin syvyydellä.

2. Menetelmät ja keskeiset tulokset

Radiohiilen isotooppivaihtoa tutkittiin nk. eräsorptiokokein (batch experiments) käyttämällä synteettistä jauhettua kalsiittia, $\text{NaH}^{14}\text{CO}_3$ leimattua merkkiainetta ja 0.0002M – 0.1M kalsiumkloridiliuosta (CaCl_2) lisättynä 0.01M natriumkloridilla (NaCl) tai 0.0001M bikarbonaatti- (NaHCO_3) + 0.005M NaCl -liuoksella. Lisäksi käytettiin kahta synteettistä pohjavesisimulanttia; makeanveden simulanttia ALL-MO ja suolaisen veden simulanttia OL-SO. Nämä simulantit jäljittelevät Olkiluodon kallioperän olosuhteita hapellisissa olosuhteissa tasapainotilassa kalsiitin, talkin ja apatiitin kanssa. Tässä osassa tutkimusta epäorgaanisen radiohiilen todettiin pidättyvän nopeasti kalsiittiin isotooppivaihdolla isotooppivaihdon puoliintumisaikojen vaihdellissa välillä 3.6 – 70 d. Korkea kalsiumpitoisuus ja matala bikarbonaattipitoisuus lisäsivät radiohiilen pidättymistä. On kuitenkin syytä huomioida isotooppivaihdon nopeutta arvioitaessa liuoksen magnesiumipitoisuus, sillä magnesium voi heikentää kalsiitin liukoisuutta ja siten myös vähentää isotooppivaihtoa. Radiohiilen isotooppivaihtoa voidaan kuvata Ca^{2+} tai HCO_3^- ioniaktiivisuuden funktiona ja siten kalsiumin ja bikarbonaatin kallioperäpitoisuuksia voidaan hyödyntää matemaattisissa malleissa arvioitaessa radiohiilen pidättymistä isotooppivaihdolla.

Isotooppivaihdon lisäksi, karbonaattimuotoisen radiohiilen sorptiota götiittiin, hematitiittiin ja magnetiittiin tutkittiin eräSORPTIOKokein pH:n ja ionivahvuuden funktiona. Sorptioisotermien määrittämiseksi NaHCO_3 liuokset valmistettiin 0.01 M TRIS (tris(hydroxymethyl)aminomethane) puskuriin (pH 8.2) ja leimattiin $\text{NaH}^{14}\text{CO}_3$ merkkiaineella. pH- ja ionivahvuuskokeissa käytettiin NaCl-liuoksia (0M, 0.01M ja 0.1M), joiden pH säädettiin natriumhydroksidi- (NaOH) ja suolahappoliuoksin (HCl). Karbonaatin todettiin sitoutuvan huomattavasti götiittiin ja hematitiittiin, pH:sta riippuen (kuva 21A, 1B), mutta magnetiittiin pidättymisen todettiin olevan häviävän pieni kaikissa tutkituissa olosuhteissa. Götiittiin ja hematitiittiin pidättyminen oli suurinta neutraalilla pH-alueella ja pieneni pH:n noustessa. Tämä johtuu mineraalipintojen pienenevästä positiivisesta varauksesta pH:n noustessa. Karbonaatin sorption todettiin lisäksi vähenevän jossain määrin ionivahvuuden kasvaessa (kuva 21), mikä voi johtua pinnan sorptiopaikkojen saturoitumisesta kloridi-ioneilla pinnoilla, jotka tyypillisesti osallistuvat ulkokompleksien muodostukseen. EräSORPTIOKokeiden tulokset voitiin mallintaa melko hyvin käyttämällä pintakompleksaatioon perustuvaa kaksoiskerrosmallia (generalized double-layer surface complexation model).

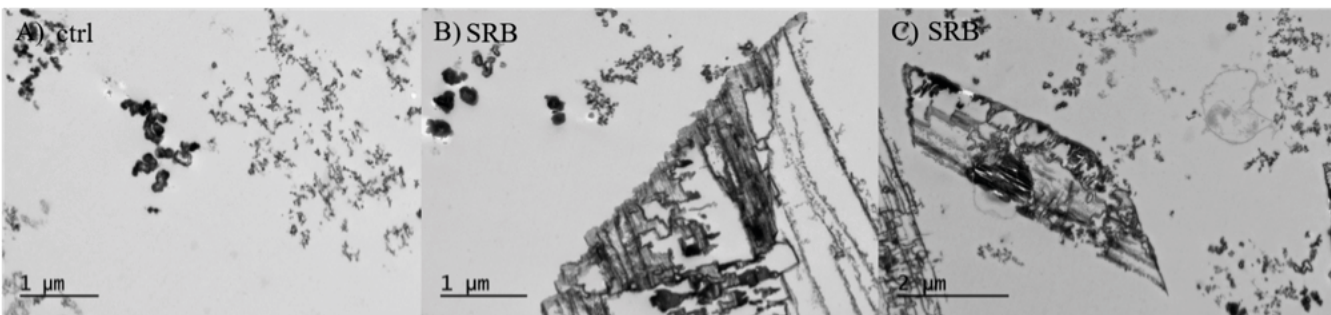


Kuva 21. Karbonaattimuotoisen radiohiilen (^{14}C) jakaantumiskertoimet (K_d [ml/g]) hematitille (A) ja götiitille (B) pH:n funktiona kolmessa eri ionivahvuudessa (milliQ-vesi/ 0 mM NaCl, 10 mM NaCl ja 100 mM NaCl).

Isotooppivaihto ja pidättyminen raudan hydroksideihin pätee vain epäorgaaniseen radiohiileen, ei orgaanisiin muotoihin kuten metaaniin. Jotta voitaisiin ennustaa radiohiilen kulkeutumista kallioperässä, tarvitaan jatkotutkimuksia koskien hiilen

spesiaatiota ja siihen sekä pidättymiseen vaikuttavia biologisia tekijöitä kallio-perässä. C14ROCK-projektin toisessa vaiheessa tutkittiin sulfaattia pelkistävien bakteerien (SRB) vaikutusta radiohiilen spesiaatioon ja poistumiseen liuoksesta käyttämällä DSMZ:n (Deutsche Sammlung von Mikroorganismen und Zellkulturen GmbH) kokoelmasta hankittua *Desulfovibrio desulfuricans* bakteerin kantaa. Soluja kasvatettiin kolmessa erilaisessa kasvuliuksesta (A-C), joissa suolojen ja ravinteiden pitoisuudet vaihtelivat. Yksi liuoksista (A) koostui tyypillisestä *D. desulfuricansille* käytetystä kasvuliuksesta, joka sisälsi suolojen lisäksi Na-DL-laktaattia ja hiivauutetta hiilen ja muiden ravinteiden lähteenä. Kahden muun liuoksen (B ja C) pohjana käytettiin OL-SR pohjavesisimulanttia, joka jäljittelee Olkiluodon kalliooperän hapettomia olosuhteita. Pelkistimenä käytettiin Na-thioglykolaattia. Liuos B sisälsi Na-DL-laktaattia ja hiivauutetta, mutta liuoksesta C nämä puuttuivat. C liuos sisälsi ainoastaan OL-SR pohjavesisimulantin, pelkistimen, sitruunahapon ja redox-indikaattorin (jotka sisältyivät myös liuoksiin A ja B). Soluja inkuboitiin 7–21 päivää hapettomissa, hyvin pelkistävissä olosuhteissa (redox – 200 – (–) 400 mV). Radiohiilen biosorptio/bioakkumulaatiokokeissa käytettiin $\text{NaH}^{14}\text{CO}_3$ -leimatuja näytteitä ja bakteerien vaikutusta spesiaatioon tutkittiin käyttämällä liuoksissa 0–41 μM NaHCO_3 - tai 510 mM CH_4 -lisää. Näissä kokeissa määritettiin sulfaatin pelkistykseen yhteydessä tapahtuvaa muutosta (Δ) CO_2 , CH_4 , laktaatti- ($\text{CH}_3\text{CH}(\text{OH})\text{CO}_2\text{H}$) ja asetaatti- (CH_3COOH) pitoisuuksissa. Lisäksi SRB bakteerien indusoimaa kalsiitti-kiteiden muodostusta tutkittiin käyttämällä elektronimikroskopiaa (TEM). Solumäärän arviointiin käytettiin sulfaattia pelkistävää geeniä (*dsrB*, qPCR-menetelmä) ja kokeissa näytteisiin lisättiin 3.9×10^3 geenikopiota/näyte. Yllä mainituissa kokeissa, SRB bakteerien todettiin tehokkaasti poistavan 40–98 % liuokseen lisäystä karbonaattimuotoisesta radiohiilestä, ravinneolosuhteista riippuen (liuokset A, B ja C). Inkubaatioajalla ei ollut selkeää vaikutusta poistumiseen ja korkeinta radiohiilen poistuminen oli OL-SR liuoksessa, johon oli lisätty Na-DL-Laktaattia ja hiivauutetta ravinteiden ja hiilen lähteiksi. Kuitenkin, myös hyvin alhaisissa ravinneolosuhteissa (liuos C), havaittiin merkittävää (53–72 %) radiohiilen poistumista liuoksesta. Mikroskooppisissa tutkimuksissa havaittiin kiteiden (todennäköisesti kalsiittia) muodostumista SRB bakteereita sisältävissä näytteissä (kuva 22). Samanaikaisesti havaittiin heikko mutta statistisesti merkittävä positiivinen korrelaatio ($r=0.419$, $p=0.02$) ΔCO_2 :n ja ^{14}C -aktiivisuuden laskun välillä. Lisäksi havaittiin statistisesti merkittävä positiivinen riippuvuus laktaatin käytön ja asetaatin tuoton välillä ($R=0.844$, $p=0.002$) sekä voimakas positiivinen korrelaatio SO_4^{2-} -pelkistykseen ja laktaatin käytön ($R=0.952$, $p = 2.2 \times 10^{-5}$) ja asetaatin tuoton ($R=0.882$, $p=7.5 \times 10^{-4}$) välillä. CH_4 -lisätyissä näytteissä voitiin havaita lisääntyntä metaanin muuttumista

hiilidioksidiksi SRB bakteereita sisältävissä näytteissä, verrattuna näytteisiin, joihin bakteereita ei oltu lisätty. SRB bakteereita sisältävissä näytteissä CH_4 pitoisuudet olivat keskimäärin 30 % matalampia, kuin bakteerittomissa näytteissä. Vastaavasti CO_2 pitoisuudet olivat keskimäärin 53 % korkeampia SRB bakteereita sisältävissä liuoksissa. Metaaninkäytön ja hiilidioksidin tuoton välillä todettiin positiivinen statistisesti merkittävä korrelaatio ($R=0.859$, $p<0.05$). Keskimääräinen metaanin käyttö laski eksponentiaalisesti vapaan sulfaatin konsentraation funktiona. Statistisesti merkittävää korrelaatiota metaanin käytön ja liuoksen vapaan sulfaattipitoisuuden välillä metaanilisätyissä näytteissä ei kuitenkaan voitu osoittaa.



Kuva 22. B) ja C) karbonaatin poistumisen yhteydessä havaittuja kiteitä (todennäköisesti kalsiitti) SRB bakteereita sisältävässä 41 μM karbonaattiliuoksessa. Kontrolliliuoksessa A) (41 μM karbonaattiliuos ilman SRB bakteerilisää) vastaavia kiteitä ei havaittu.

Arvioitaessa ydinjätteen loppusijoituksen pitkäaikaisvaikutuksia, voidaan tässä projektissa saatujen tulosten pohjalta olettaa, että karbonaattimuotoinen radiohiili ei ole täysin sorboitumaton, kuten nykyään konservatiivisissa turvallisuusanalyyseissä oletetaan. Karbonaattimuotoisen radiohiilen kalsiittiin tapahtuvan isotooppi-vaihdon lisäksi, radiohiilen sitoutuminen raudan oksideihin voi estää sen nopean kulkeutumisen biosfääriin. Lisäksi, syvän kallioperän mikrobisto voi vaikuttaa sekä radiohiilen spesiaatioon, että sen pidättymiseen kallioperässä johtuen spesiaatiomuutoksista CH_4 ja CO_2 välillä pelkistävissä olosuhteissa, sekä karbonaattimuotoisen radiohiilen pidättymisestä bakteerisoluihin ja lopulta biogeenisen kalsiitin muodostuksesta.

6.6.5 Applicability of Geopolymers in Nuclear Waste Management – GeoP-NWM (Hanke 25)

Tarja Laitinen, Eila Lehmus, Tapio Vehmas, Markku Leivo, Kalle Loimula, Markus Olin, VTT

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää geopolymeeri-perusteisten matriisien soveltamista matala- ja keskiaktiivisen ydinjätteen kiinteytykseen ja stabilointiin. Tutkimuksessa vertailtiin eri sideaineita geopolymeerien valmistuksessa: lentotuhka, ferromasuunikuona ja metakaoliini. Referenssi-materiaalina tutkimuksissa käytettiin Portlandsementtiä, joka on laajasti käytössä oleva materiaali kiinteytykseen ja stabilointiin.

Portlandsementtipohjaisilla materiaaleilla on todettu yhteensopivuusongelmia orgaanisen jätteen kiinteytyksessä. Tiedyt orgaaniset jätteet häiritsevät sementin hydrataatioprosessia ja matriisin kovettuminen hidastuu tai jopa pysähtyy. Lisäksi sementtipohjaisilla matriiseilla kiinteytyks perustuu lähinnä fysikaaliseen kapseloitumiseen.

Tutkimus jakaantui kolmeen vaiheeseen. Ensimmäinen vaihe koostui kahdesta kirjallisuusselvityksestä, joissa käsiteltiin geopolymeerien yleisiä ominaisuuksia sekä spesifisemmin geopolymeerien soveltuvuutta matala- ja keskiaktiivisen ydinjätteen loppusijoitukseen. Tutkimuksen toisessa vaiheessa selvitettiin eri sideaineiden suhteitusvaatimuksia ja laadittiin menetelmä geopolymeerien suhteittamiseksi. Kolmannessa vaiheessa määritettiin eri sideainepohjaisten geopolymeerien vaikutus Cs -ionin liukenemiseen ja diffuusioon. Laskelmien perusteella Cs on pääasiallisesti vastuussa radioaktiivisen ioninvaihtohartsin säteilystä ensimmäisten kolmensadan vuoden aikana.

Kirjallisuusselvitysten perusteella geopolymeerit eroavat huomattavasti Portlandsementistä. Portlandsementti ja geopolymeerit ovat molemmat alkalisia sementtejä. Ne kovettuvat alkalisissa olosuhteissa tuottaen lujan loppurakenteen. Molemmat myös sisältävät piitä ja alumiinia koostumuksessaan. Suurin ero on kalsium määrässä. Portland sementti sisältää huomattavasti kalsiumia. Portlandsementin pääreaktiotuote on kalsium-silikaatti-hydraatti jossa lyhyet piiketjut ovat kalsiumoksidikerrosten ympäröimät. Geopolymeereissä pääreaktiotuote taas koostuu kolmiulotteisesta pii/alumiiniverkostosta. Johtuen pääreaktiotuotteesta,

geopolymeerejä on myös joskus nimitetty polysialaateiksi joka olisi kuvaavampi nimitys tuotteelle.

Johtuen erilaisista pääreaktiotuotteista myös lujuudenkehityksen määrittävä reaktiomekanismi eroaa Portlandsementin ja geopolymeerien välillä. Portlandsementin kovettumisreaktio on hydrataatioprosessi jossa korkeassa lämpötilassa muodostuneet epästabiilit kalsiumsilikaatit hydratoituvat. Geopolymeereissä kovettumisprosessi on nukleofiilinen additio, jossa piioksidin elektronivajaa happi pyrkii muodostamaan kovalenttisen sidoksen elektronirikkaaseen alumiiniin. Prosessia voidaan kuvata polymerisoitumisena, josta tuotteen nimi on osittain johdettu. Johtuen erilaisista pääreaktiotuotteista ja reaktiomekanismeista, reaktioon vaikuttavat tekijät myöskin eroavat. Hydrataatioprosessi on herkkä orgaaniselle materiaaleille, kun taas geopolymeroituminen on herkkä lämpötilalle ja alkalikonsentraatiolle.

Kirjallisuusselvityksen perusteella geopolymeerit soveltuvat erinomaisesti matala- ja keskiaktiivisen ydinjätteen kiinteytykseen ja stabilointiin. Geopolymeerit sitovat pysyvästi suurimman osan moniarvoisista alkulaineista kidehilaansa, lisäksi geopolymeereistä voidaan poistaa kuumentamalla vesi jolloin, vältetään veden autoklyylin aiheuttamista ongelmista. Geopolymeerit ovat myös tulenkestäviä ja esimerkiksi lentotuhkapohjaiset geopolymeerit ainoastaan lujittuvat lisää korkeissa lämpötiloissa.

Ongelmallisin osio kirjallisuusselvityksen perusteella on geopolymeerien suhteittaminen. Tutkimuksen toisessa vaiheessa geopolymeerien suhteittamista lähestyttiin betonitekniikan käsittein ja menetelmin. Eri sideaineiden vedentarve tietyssä laastikoostumuksessa määritettiin vakiomalla laastien työstettävyyttä mitattuna standardoidulla menetelmällä. Tulosten perusteella masuunikuonan ja lentotuhkan vedentarve on pieni verrattuna metakaoliinin vedentarpeeseen. Masuunikuonaan ja lentotuhkaan voitiin soveltaa sellaisenaan betonitekniikassa käytettyjä menetelmiä. Metakaoliinilla selvitettiin menetelmiä vähentää vedentarvetta. Yleisimpien alkalisementtien dispergointiaineiden vaikutus metakaoliiniin tutkittiin tuloksetta. Markkinoilla ei ole saatavilla dispergointiainetta joka vähentää metakaoliinin vedentarvetta. Ainoa toimiva menetelmä vähentää metakaoliinin vedentarvetta on alkalisilikaattien käyttö. Geopolymeerien lujuudenkehityksen todettiin riippuvan kahdesta tekijästä; vesi/sideainesuhteesta ja alkaliannostuksesta. Tutkimuksessa päädyttiin kuvaamaan näiden kahden tekijän vaikutusta kolmiulotteisella tasolla, jolloin

suhteittaminen vakiolujuuteen voitiin suorittaa joko alkaliannostusta tai vesi/sideainesuhdetta muuttamalla.

Tutkimuksen kolmannessa vaiheessa selvitettiin eri sideaineiden Vaikutusta Cs -ionin sitoutumiseen ja diffuusioon. Tutkimuksessa kehitetyn suhteitusmenetelmän pohjalta valmistettiin laastinäytteitä eri sideaineilla, ja näiden laastinäytteiden ja ioni-vaihdetun veden jakaantumis- ja diffuusiokerroin määritettiin kokeellisesti. Määrittys suoritettiin lisäämällä tunnettu Cs -pitoisuus joko laastimassaan tai ionivaihdettuun veteen. Kovettuneet laastit hienonnettiin alle 1 mm partikkelikokoon, vesi ja laastijauhetta sekoitettiin ravistelijassa koko altistuksen ajan. Neljäntoista vuorokauden kuluttua näytteet suodatettiin ja liuoksen Cs pitoisuus määritettiin ICP -menetelmällä. Tulosten perusteella laskettiin diffuusio- ja jakaantumiskerroin olettaen reversiibeli Fickin diffuusio näytteen ja liuoksen välillä. Tulokset on esitetty taulukossa 8.

Tulosten perusteella metakaoliinilla on paras kyky sitoa cesium itseensä kemiallisesti ja huonoin Portlandsementillä. Pienin suhteellinen diffuusiokerroin todettiin masuunikuonalla ja vastaavasti suurin metakaoliinilla. Diffuusioikertoimeen pystytään vaikuttamaan massan suunnittelulla. Tutkituissa näytteissä tiiveyttä ei optimoitu, jotta jakaantumiskertoimenmäärittystarkkuus paranisi. Jakaantumiskerroin on todennäköisesti riippuvainen ainoastaan käytetyistä materiaaleista. Tulosten perusteella metakaoliinipohjainen geopolymeeri on oikein suhteitettuna hyvä vaihtoehto kiinteytykseen ja stabilointiin, jos menetelmä sallii alkalisisilikaattien käytön prosessiteknisesti. Myös Portlandsementin seostaminen masuunikuonalla ja/tai lentotuhkalla voi olla myös hyvä vaihtoehto parantaa olemassa olevien Portlandsementtien kykyä sitoa cesiumia.

Taulukko 8. Laastinäytteiden jakaantumis- ja suhteelliset diffuusioikertoimet.

Sideaine	Jakaantumiskerroin	Suhteellinen diffuusioikerroin
Portlandsementti	0,75	1
Masuunikuona	0,58	0.2
Lentotuhka	0,24	1.7
Metakaoliini	0,16	11.6

6.6.6 Ydinjätteen Riskien Arviointiin Soveltuvan Radioekologisen Mallintamisen Kehittäminen Maa- ja Vesiekosysteemissä – YRMA (Hanke 26)

Jukka Juutilainen, Jarkko Akkanen, Jouni Sorvari, Tiina Tuovinen, Soroush Majlesi, Jonne Naarala, Itä-Suomen yliopisto

1. Tutkimusaihe ja tutkimuksen keskeiset tulokset

Hankkeen yleisenä tavoitteena oli tarkentaa suomalaisiin metsä- ja vesiekosysteemeihin soveltuvaa radioekologista mallintamista ja sen käyttöä loppusijoituksen mahdollisten riskien arviointiin. Tavoitteina oli

- tutkia radionuklidien siirtymistä sellaisiin makean veden ravintoketjujen avainlajeihin, joista oli vähän aiempaa tietoa.
- kehittää radioekologisia malleja siten, että ne perustuvat entistä parempaan teoreettiseen ja empiiriseen ymmärrykseen alkuaineiden siirtymisestä eliöihin.
- kehittää menetelmiä, joilla saadaan tietoa pienten säteilyannosten vaikutuksista eliöihin.

Koealueella Paukkajanvaarassa sijaitsevien lampien sedimenttiäytteiden U-pitoisuudet olivat n. 500- ja n. 90-kertaiset verrattuna lähialueelta valittuun vertailulampeen. Monien muidenkin tutkimuksen kannalta oleellisten alkuaineiden (sel-laisten, joilla on ydinvoimalajätteen riskien kannalta merkityksellisiä radionuklideja) pitoisuuksissa oli huomattavia eroja. Tulokset sopivat yhteen aiempien maaekosysteemeistä saatujen tulosten kanssa, ja osoittivat, että alkuaineiden siirtyminen eliöihin ei ole lineaarista myöskään vesiekosysteemissä. Tämä havainto on tärkeä radioekologisten mallien kehittämisen kannalta. Jatkotutkimusten kannalta tärkeä havainto oli myös se, että uraanin ja monien muiden alkuaineiden pitoisuudet orgaanisessa sedimentissä olivat suuria, esimerkiksi uraanilla luokkaa 10^5 kertaa suurempia kuin vedessä. Tämä viittaa vahvasti siihen, että suomalaisten järvien ja lampien ravintoketjuissa (joissa hajoava orgaaninen aine on yleensä tärkeämpi aineen ja energian lähde kuin fotosynteesi) eliöiden saamien radionuklidien pääasiallinen lähde on orgaaninen sedimentti eikä vesi, toisin kuin radioekologisissa malleissa useimmiten oletetaan. Vaikutustutkimuksissa surviaissääsken (*Chironomidae*) toukilla ei saatu tukea sille, että vaihteleva epäsymmetria (fluctuating asymmetry) olisi erityisen herkkä haittavaikutusten indikaattori: vaikka kaivosalueen lampien

sedimentissä kasvattaminen hidasti aikuisten sääskien kuoriutumista kotelosta, se ei aiheuttanut muutoksia siipien epäsymmetriassa.

2. Tulosten merkitys ydinjätehuollon tutkimuksen kannalta ja yhteydet muuhun tutkimukseen

Käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoittamisen turvallisuusanalyysiin liittyvässä biosfäärimallinnuksessa tarvitaan tietoa radionuklidien siirtymisestä vedestä eliöihin. Suomalaisiin ympäristöolosuhteisiin tarkennettu tieto ja kehittyneempi radioekologinen mallintaminen parantavat ennsteiden luotettavuutta. Potentiaalisia hyödyntäjiä ovat luvanhaltijat, viranomaiset ja kaikki ne tahot, jotka tarvitsevat ydinjätteiden mahdollisten riskien arviointiin liittyvää biosfäärimallinnusta. Lisäksi saatuja tuloksia voidaan hyödyntää mm. uraanimalmin etsinnän ja mahdollisten uraani-kaivosten tai uraanipitoista malmia louhivien kaivosten ympäristövaikutusten arvioinnissa sekä yleisesti radioekologisten mallien kehittämisessä.

Itä-Suomen yliopiston aiemmissa KYT-hankkeissa keskityttiin terrestristen metsäekosysteemien radioekologiaan. Näiden tutkimusten jättämiä avoimia kysymyksiä (mm. alkuaineiden otto metsäekosysteemin avainlajeihin, ^{14}C :n siirtyminen maaperästä biosfääriin) pyritään tutkimaan jatkotutkimuksissa muulla (mm. säteilyä) rahoituksella. Vesiekosysteemeihin kohdistuvien vaikutusten kokeellista tutkimusta mikrokosmoksissa on tehty ja tehdään NKS:n rahoittamissa NORCO ja NORCO2-hankkeissa, joihin osallistuvat Tukholman yliopisto, Norjan ympäristö- ja biotieteiden yliopisto, Statens strålevern, STUK ja Itä-Suomen yliopisto. Ensimmäiset, marraskuussa 2016 päättyneet kokeet tehtiin ulkoisella säteilyllä. Jatkotutkimuksissa selvitetään mm. edellytyksiä radionuklideilla tehtäviin kokeisiin.

3. Menetelmät

Tutkimusalueeksi valittiin Enon Paukkajanvaarassa sijaitseva käytöstä poistettu ja ennallistettu uraani-kaivosalue. Alueen kahdesta lammesta (Iso Hiislampi ja Pieni Hiislampi) sekä kauempana lähialueella sijaitsevasta vertailulammesta otettiin näytteiksi vettä, sedimenttiä, surviaissääsken toukkia (ja muita näytteisiin päätyneitä vesieliöitä), särkiä ja ahvenia. Näytteistä määritettiin alkuainepitoisuudet ICP-MS-menetelmällä, ja näiden pitoisuuksien avulla analysoitiin alkuaineiden siirtymistä vedestä/sedimentistä eliöihin.

Vaikutustutkimuksia tehtiin laboratoriossa kasvattamalla surviaissääsken (Chironomidae) toukkia koealueen lampien sedimenteissä. Kehitysepävakautta mitattiin kuoriutuneiden sääskien siipien epäsymmetrisyydellä. Toisena haitta-vaikutusten indikaattorina tutkittiin kotelosta aikuiseksi kuoriutumiseen kuuluvaa aikaa.

6.6.7 Biosfäärimallinnuksen vaihtoehtoiset menetelmät ja niiden arviointi – VABIA (Hanke 27)

Tarmo Lipping, Jari Pohjola, Jari Turunen, Tampereen teknillinen yliopisto

Tutkimusaihe ja tutkimuksen keskeiset tulokset

Tutkimusaiheena VABIA-hankkeessa oli radionuklidien kulkeutumista simuloivan biosfäärimallin vaikuttavien osakokonaisuuksien arviointi ja yksinkertaistaminen niin, että esimerkiksi tietty osakokonaisuus voitaisiin korvata joko vakiolla tai liittää toiseen osakokonaisuuteen. Biosfäärimallin radionuklidien kulkeutumisen kokonaisvaikutus ei lisäksi saa muuttua suuruusluokkatasolla. Biosfäärimallina käytettiin hankkeen alkuvaiheessa suhteellisen yksinkertaista ja omavaraista järvi-maatilamallia, missä talousvesi otetaan suoraan järvestä (kaivoon liittyvien pohjaveden säätöparametrien välttämiseksi). Talousvettä käytetään pesuvetenä ja omavaraistalouden vihannesten ja marjapensaiden yms. kasteluvetenä sekä eläinten juomavetenä.

Mallin järvenä käytettiin Olkiluodon ydinjäteluolaston lähelle, nykyiselle meri-alueelle, noin v. 3000 AP syntyvää järveä, jota on kutsuttu myös Liponjärveksi läheisen Liponsaaren mukaan. Samaan aikaan luolastossa oletetaan tapahtuvan vuoto, jonka suuruus on 1 Bq/vuosi. Vuoto siirtyy pohjavesivirtauksien mukana järveen, josta radionuklidit, joiksi valikoituivat ^{36}Cl , ^{135}Cs , ^{129}I , ^{237}Np , ^{90}Sr , ^{99}Tc ja ^{238}U , siirtyvät talousveden mukana maatilalle. Vuoden 2015 mallissa olivat myös mukana pinta- ja keskisedimentit järvestä, joiden kanssa järvi- ja maavesi reagoi ylhäältäpäin. Mallissa oletettiin, että omavaraistaloudessa järvestä pyydystetään kalaa ravinnoksi. Järven tilavuuden epävarmuutta ja vaihteluväliä oli tutkijatohtori Jari Pohjola tutkinut väitöskirjassaan 2014, ja tämä epävarmuus sisällytettiin mukaan tutkimukseen. Tarkasteluvälinä tutkimuksessa oli 3000-10000 AP, jolloin myös saturoituminen ja mahdollinen pitkän aikavälin kumuloituminen ja tasoittuminen saadaan mukaan arviointiin.

Malliin syötettävät parametrit generoitiin Monte Carlo simulaation avulla taulukoista saaduista keskiarvoista ja keskihajonnoista, sekä muista jakaumiin liittyvistä parametreista. Ihmisten ruoka-aineiden kulutusta arvioitiin Finravinto 2012 -tutkimuksen taulukoiden avulla. Lopputuloksena saatiin herkkyystarkastelu malliin vaikuttavien parametrien välille.

Merkittävimpiä tuloksia vuoden 2015 tutkimuksesta oli, että järvioltaan koolla ei ollut vaikutusta ihmisten saamiin annosmääriin. Sen sijaan järven ulosvirtaus oli paljon merkittävämpi järven tilavuuteen nähden. Myös K_d -arvot, eli jakautumiskertoimet kiinteän ja nestemäisen aineen välillä peltomaassa sekä järven pohja-sedimentissä olivat merkittävässä roolissa.

Vuoden 2016 aikana mallia muutettiin siten, että pohjaveden oletettiin tunkeutuvan sedimenttien läpi järviveteen ja mallinnukseen lisättiin hengitysilmaan pölynä siirtyvä radionuklidi ^{94}Nb . Koska tulevan Liponjärven alue on kaikuodattu Posiva Oy:n toimesta peruskallioon asti, erilaisten pohjasedimenttien paksuuksista voitiin tehdä jakaumat mallinnusta varten.

Tuloksista selvisi, että pohjasedimentit vaimensivat, osittain myös puskuroiden, radionuklidien kulkeutumista järviveteen. Herkkyystarkastelussa voitiin todeta, että pohjasedimentteihin liittyvien parametrien, kuten esimerkiksi eri kerrosten K_d -arvojen vaikutus oli isoin suurimmalla osalla nuklideista. ^{36}Cl ja ^{99}Tc -nuklideilla, jotka pidentäytyvät heikommin pohjasedimenttiin, parametrit liittyen kasteluveden imeytymiseen peltomaahan ja siitä edelleen kasvien juuristoon olivat suurimmassa roolissa.

Vuoden 2017 haku jäi väliin aikataulullisista syistä.

Vuoden 2018 haussa sedimentti-maatilamallia laajennettiin sisältämään metsästä saatava ravinto-osuus, eli riista, marjat ja sienet. Metsän oletetaan sijaitsevan Liponjärven vieressä ja radionuklidit kulkeutuvat pintamaahan sedimenttien läpi. Mallissa otetaan huomioon muun muassa radionuklidien siirtyminen maaperästä puihin, puun ja lehtien maatumisen sekä radionuklidien siirtyminen sieniin. Erica-työkalan avulla voidaan arvioida marjoihin ja riistaeläimiin siirtyvän säteilyn määrää. Tulosten perusteella metsämallin lisääminen vaikuttaa eniten kasvattavasti ihmisen saamaan säteilymäärään nuklideilla ^{36}Cl , ^{129}I ja ^{237}Np . Säteilymäärän lisäys on maltillisin nuklideilla ^{90}Sr ja ^{99}Tc .

Tulosten merkitys ydinjätehuollon tutkimuksen kannalta

Skenaariopohjaisena VABIA-tutkimus kuuluu osioon ”muut turvallisuustutkimukset”, jossa tarkastellaan ihmisen saamia säteilymääriä pahimpien skenaarioiden yhteydessä. VABIA-skenaariot ovat toteutettu tarkastelulla 1Bq/vuosi; koska käytettävät mallit ovat lineaarisia, niiden tuloksia voidaan skaalata vastaamaan kontaminaation eri tasoja. Pitkän aikavälin (~10000 vuotta) tarkastelu on aina riskialtista, sillä epävarmuuksia on paljon. Tämän vuoksi mahdollisimman hyvin epävarmuudet huomioon ottava herkkyysanalyysiperustainen skenaariotarkastelu on lähes ainoa keino tarkastella ydinjätevaraston sinetöinnin jälkeistä tulevaisuutta.

Tarkastelukaudella 2015–2018 selvitettiin yhteistyömahdollisuuksia professori Jukka Juutilaisen (Itä-Suomen yliopisto) kanssa. Professori Juutilaisen tutkimuskohde, eli orgaanisista pintasedimenteistä surviaissääsken toukkien kautta ahveniin siirtyvät radionuklidit ja niiden vaikutus annosmuunnoskertoimiin olisi ollut hyvä tarkastelulisä sedimenttimalliin, mutta ajanpuutteen vuoksi sitä ei ehditty toteuttaa.

Tutkimuksessa käytetyt menetelmät

Tutkimuksen lähtökohtana oli siis epävarmuuksiin perustuva skenaariopohjainen tarkastelu. Epävarmuuksia hyödynnettiin kaikkiin parametreihin, mihin oli saatavilla niiden tilastollisia jakaumia kuvaavia suureita. Tällaisia parametreja ovat esimerkiksi Kd-arvot, ihmisten ruokavalio ruoka-aineittain ja pohjasedimenttien paksuudet. Epävarmuusjakaumista arvottiin syötteet Monte Carlo-simulaatiolla Facilian EcoLego-mallinnusohjelmistolla tehtyihin kompartmenttimalleihin. Metsämallien yhteydessä Kd-arvoja arvioitiin Norwegian Radiation Protection Authorityn Ericatyökalulla.

Herkkyystarkasteluissa esikarsinta suoritettiin Morris-menetelmällä, joka on osa EcoLegon herkkyystarkastelu-työkalukokonaisuutta. Tämän jälkeen tuloksia tarkasteltiin Sobol'in, ja myöhemmin myös Fourier Amplitude Sensitivity Test (FAST), Extended Fourier Amplitude Sensitivity Test (EFAST) ja Random Balance Design (RBD) -menetelmillä.

Tulosten yhdistelyyn ja visualisointiin käytettiin Mathworksin Matlab-työkalua.

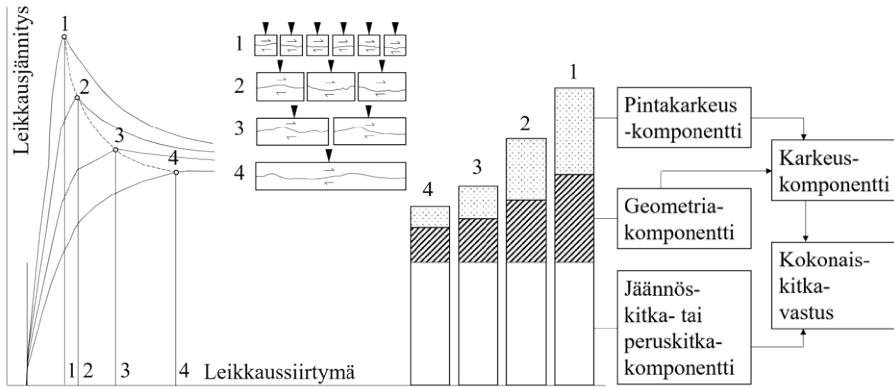
6.6.8 Kallion Rakopintojen Mekaaniset Ominaisuudet – KARMO II-III (Hankkeet 28–29)

Mikael Rinne, Lauri Uotinen, Enrique Caballero, Jukka Piironen, Veli-Antti Hakala, Juha Antikainen, Joni Sirkiä, Magdalena Dzugala, Aalto-yliopisto, Rakennustekniikan laitos

KARMO-tutkimusjatkumon (KARMO I 2014, KARMO II 2015–2016, KARMO III 2017–2018) tavoitteena oli tuottaa menetelmä kallion rakopintojen mekaanisten ominaisuuksien määrittämiseksi numeerista mallinnusta varten laboratoriomittakaavan koesarjan avulla. Tutkimusaiheena oli rakojen leikkauslujuuden aleneminen koon kasvaessa. Aineistona hankkeessa käytettiin Kurun harmaasta graniitista leikattuja isoja tasalaatuisia näytteitä joihin aiheutettiin vetorako mekaanisesti kii-laamalla. Kivinäytteiden raot digitoitiin hankkeessa kehitetyllä fotogrammetrisella menetelmällä. Digitaaliset raot uudelleenskaalattiin ja 3D-tulostettiin muovisiksi valumuoteiksi. Lopuksi laastista valmistettiin 17 cm x 6 cm kokoisia jäljenteitä mittakaavan vaikutuksen tutkimista varten. Tutkimuksen myöhemmissä vaiheissa tehtiin suuren mittakaavan (2 m x 1 m ja 0,5 m x 0,25 m) leikkauskokeita kivilaattapareille joilla validoitiin tutkimustuloksia kun mittakaavaa kasvatetaan. Kaikkien pintojen karkeus määritettiin sekä subjektiivisesti profilometrillä että objektiivisesti digitaalisen suunnatun pintakarkeuden avulla. Tuloksena hanke tuotti ainetta rikkomattoman menetelmän rakopintojen karkeuden tallentamiseksi, kehitti suurten mittakaavan laboratorioskokeiden koestusta eteenpäin sekä tuotti tavan jolla rakopintojen mekaanisia ominaisuuksia voidaan määrittää digitoiduista rakopinnoista. Hanke tuotti kolme keksintöilmoitusta, jotka johtivat yhteen patenttihakemukseen, yhteen kaupallistamisprojektiin (Fractuscan TUTL) sekä yhteen startup-yritykseen.

Tutkimusaihe

Kallion rakopintojen mekaaniset ominaisuudet riippuvat koestusmittakaavasta (kuva 23). Laboratorinäytteet ovat pituudeltaan vain 50...200 mm ja kalliomassan mittakaavassa esiintyvät jatkuvat raot voivat olla jopa kymmeniä metrejä pitkiä. Luonnollisten, häiriintymättömien rakojen koestaminen on kallista ja alueellisesti epäedustavaa. KARMO:n tavoitteena oli kehittää menetelmä miten pienten rakopintanäytteiden avulla voitaisiin johtaa luonnonrakojen mekaaniset ominaisuudet numeerista mallintamista varten. Mallintamista käytetään esimerkiksi arvioitaessa kallion rakojen siirtymäpotentiaalia käytetyn polttoaineen varastoissa.



Kuva 23. Mittakaavan (vas.) vaikutus leikkauslujuuden (kesk.) kolmeen komponenttiin (oik.) pintakarkeuteen, geometriaan ja peruskitkaan lähteestä Bandis et al. (1981).

Tutkimuksen keskeiset tulokset

Replikaatioprosessin todennus- ja kehitystehtävä: Keväällä 2015 Laura Tolvanen teki kokeellisen kandiditutkimuksen, jossa selvitettiin menetelmään soveltuvaa helposti toistettavissa olevaa itsestiytyvän betonin reseptiä nykyisen kaupallisen valmislaastituotteen tilalle (Tolvanen 2015). KARMO I -vaiheessa kehitetty menetelmäkuvaus esitettiin ISRM 2015 -konferenssissa Kanadassa. Esitys herätti suurta mielenkiintoa mm. käytettyjen 3D-tulostusmateriaalien osalta ja saavutetun tarkkuuden osalta. Lisäksi keskustelussa pohdittiin olisiko myöhemmin mahdollista tulostaa replikamateriaalia suoraan leikkauskokeita varten tai käyttää muovitulosteita replikamateriaalina (Uotinen et al. 2015).

Fotogrammetrian kehitystehtävä: Kandityöntekijä Pauliina Kallio valokuvasi replikanäytesarjan valumuotit ja jo koestetut näytteet fotogrammetrisia mittauksia varten. Tutkimuksessa menetelmän tarkkuutta onnistuttiin parantamaan ja ylä- ja alapintamuottien välillä havaittiin eroavaisuuksia (Kallio 2015). Diplomityöntekijä Joni Sirkiän digitaalisen tarkkuuden mittaustulosten mukaan osassa näytteistä geometria kyettiin säilyttämään hyvin replikaan asti. Valtaosassa geometriaa kuitenkin menetettiin liikaa (Sirkiä 2015). Keväällä 2016 Joni Sirkiä teki täydentäviä tutkimuksia diplomityön tulosten pohjalta ja selvensi menetelmän virhelähteitä. Ensimmäisessä julkaisussa verrattiin käsin mitattuja ja digitaalisesti mitattuja raon karkeuksia ja todettiin menetelmän yliarvioivan karkeutta (Iakovlev et al. 2016). Toisessa julkaisussa saatiin samansuuntaisia tuloksia ja digitaalinen menetelmä yliarvioi karkeutta 2–3 JRC-arvoa (Sirkiä et al. 2016).

Jatkuvan raon mallintaminen: Kevään 2016 Magdalena Dzugalan diplomityössä hankittiin kaksi tuoretta halkaistua graniittilaattaa, joissa on molemmat rakopinnan puoliskot. Rakopinnot skannattiin käyttäen tutkimushankkeessa kehitettyä fotogrammetrista menetelmää. Tämän jälkeen näytteet koestettiin vetoleikkauskokeena ja puristusleikkauskokeena. (Dzugala 2016) Suuremman kivilaatan (2 m x 0,95 m) vetoleikkauskokeessa esiintyi stick-slip -ilmiötä, jota ei esiintynyt pienen laatan (0,5 m x 0,25 m) puristusleikkauskokeessa, joten suuren laatan 2 m x 1 m leikkauskoe uusittiin puristusleikkauskokeena helmikuussa 2018 ja keskikoon laatan 0,50 m x 0,25 m leikkauskoe lokakuussa 2018. Uusitut kokeet mahdollistavat mittakaavatutkimukset numeerisen mallinnuksen keinoin (Kivivirta 2017). Aiempien laattakokeiden osalta tulosten vertailu on esitetty väitöskirjassa *Prediction of stress-driven rock mass damage in spent nuclear fuel repositories in hard crystalline rock and in deep underground mines* (Uotinen 2018).

Tulosten merkitys ja hyödynnettävyys

KARMO:n kehittämää fotogrammetrista rakopintojen ainetta rikkomatonta tallennusmenetelmää voidaan käyttää ydinjätehuollon tarvitsemien tilojen rakopintojen dokumentoinnissa sekä suurten rakojen mekaanisten ominaisuuksien ennustamiseen. Suurten rakojen mekaaniset ominaisuudet voidaan syöttää ison mittakaavan mallinnusohjelmistoihin, jolloin ennusteiden tarkkuus paranee. Yksi tärkeä hyödyntämisosa-alue on rakoilleen kalliomassan vedenjohtavuuden arviointi, jossa menetelmää voidaan hyödyntää kun ennustetaan rakopintojen transmissiivisuutta sekä varastoivuutta. Hanke tuotti kolme keksintöilmoitusta, jotka johtivat yhteen patenttihakemukseen, yhteen kaupallistamisprojektiin (Fractuscan TUTL) sekä yhteen startup-yritykseen, joka tähtää kehitetyn teknologian hyödyntämiseen avolouhosten vakausskennossa.

Hankkeessa kehitetyn fotogrammetrisen menetelmän käyttöä virtuaalisen koulutusympäristöjen luomisessa kokeiltiin vuonna 2018 onnistuneesti hyödyntäen Aalto-yliopiston maanalaista koulutustunnetta. Kokeen perusteella käynnistettiin MIEDU-pilottihanke (Mining Education and Virtual Underground Rock Laboratory) sekä KAVI-kokeiluhanke (Kalliolaadun visualisointi maanalaisessa rakentamisessa). Alustavien tulosten perusteella menetelmä soveltuu myös ydinjätehuollon täydennyskoulutustarpeisiin ja koulutuspilottia ehdotetaan vuodelle 2019.

Tutkimusryhmä

Hankepääällikkönä toimi prof. Mikael Rinne (Kalliomekaniikka, Aalto-yliopisto). Tutkijatohtori Lauri Uotinen toimi hankkeen projektipääällikkönä ja tutkimusryhmän johtajana sekä suoritti tulosten analyysit sekä toimi pääkirjoittajana tieteellisissä julkaisuissa ja ohjaajana opinnäytetöissä. Alireza Baghbanan osallistui tieteellisten julkaisujen kirjoittamiseen. Tutkimushanke oli opinnäytetyövetoinen ja opinnäytetyöntekijöinä tai tutkimusapulaisina toimivat Eero Korpi, Joni Sirkiä, Magdalena Dzugala, Martyna Szydłowska, Enrique Caballero, Raphaël Yorke, Antoni Kopaly, Daniil Iakovlev, Pauliina Kallio, Laura Tolvanen, Sivi Kivivirta ja Henri Munukka. Laboratoriotyöntekijöinä toimivat Veli-Antti Hakala, Otto Hedström, Jukka Piironen, Pertti Alho ja Janne Hostikka.

6.6.9 Rakosimulaattori joka kunnioittaa rakojen mitattuja pituus- ja suuntajakaumia – ROSA (Hanke 30)

Eevaliisa Laine, Mira Markovaara-Koivisto, GTK

Tutkimus toteutettiin Geologian tutkimuskeskuksen Kalliorakentaminen ja sijoituspaikat -yksikössä. Hanke jakaantui neljään osatehtävään.

Osaprojekti 1: Rakosimulointi R-ohjelmistolla

Osaprojektissa tehtiin R-ohjelmistolla uusi rakoverkkosimulaattori, jolla voi luoda diskreettejä rakoja määriteltyn tilavuuteen tilastollisia jakaumia käyttäen. Lähtöaineistona voi käyttää linjamittaus-, kairareikä- tai paljastumahavaintoja. Rakoverkkosimulaattori koostuu useista scripteistä, jotka ohjaavat käyttäjää syöttämään lähtöaineistoa, testaa automaattisesti lähtöaineiston sopivuutta erilaisiin jakaumiin ja valitsee parhaimman sovituksen. Jakaumia sovitetään rakojen kaateelle, kaateen suunnalle, rakopituudelle ja pintaominaisuuksille. Rakojen keskipisteiden sijainnit arvotaan satunnaisesti mallinnustilavuuden sisällä ja rakoneliöiden kulmapisteet lasketaan suunta- ja pituusjakaumista. Rakojen lukumäärä mallinnustilavuudessa lasketaan niiden kohtisuoraa rakotiheyttä ja pituutta hyväksikäyttäen lähtöaineistoista tai käyttäjän antaman kappalemäärän mukaan. Scriptit tulostavat työhakemistoon mm. tekstitiedoston, jossa jokaisella rivillä on yksi rako, sen suuntatiedot, pituuden, kulmapisteiden koordinaatit ja pintaominaisuudet. Rakojen ikä-suhteet huomioidaan leikkaamalla nuoremmat raot vanhemmilla raoilla. Octavella

on toteutettu rakojen tarkka leikkaaminen toisella raolla siten, että lopputuloksena saadulla pinnalla voi olla 4-5 kulmapistettä. Tuotetut diskreetit raot voidaan tuoda muihin mallinnusohjelmiin tekstitiedostona jatkokäyttöä varten.

Osaprojekti 2: Rakojen spatiaalinen jakautuminen ja rakoverkkomallien validointi

Toisessa osaprojektissa käsiteltiin rakosimuloinnin geologista ja fysikaalista validointia sekä rakotihedysten että rakogeometrioiden käyttöä rakosimuloinnissa. Tässä käytetyt ohjelmistot olivat Julia-skriptit, ISATIS, GOCAD ja FEMDEM -ohjelmistot. Kopparnäsin ja Palmotun tutkimuskohteiden rakoverkkomallit luotiin käyttäen näitä ohjelmistoja ja ROSassa kehitettyjä koodeja.

Osaprojekti 3: Kesäharjoittelija

Kesäharjoittelija Riikka Valtonen (Helsingin yliopisto) osallistui ja testasi R-koodeja vuosina 2017 ja 2018 osana muuta rakomallinnukseen liittyvää työtään GTK:ssa.

Osaprojekti 4: 3D-visualisointi

Tässä osuudessa tehtiin Julia-skriptit muuntamaan pistemäiset ja polygonitiedot vtk- ja GOCAD-tiedostoiksi. Näin voidaan käyttää vapaan lähdekoodin 3D-visualisointiohjelmistoja kuten Paraview-ohjelmistoa.

Hankkeessa tuotetut koodit antavat mahdollisuuden tehdä rakosimulointia riippumattomasti kalliista kaupallisista ohjelmistoista. R- ja Julia-koodien käyttö auttaa myös ymmärtämään rakosimuloinnin teoreettista taustaa, koska kaikki laskut ja operaatiot ovat näkyvissä. Palmotun ja Kopparnäsin rakoilututkimukset, linja- ja ympyrähavainnot ja niiden analysointi antoivat myös lisätietoa Suomen kallioperän rakoilusta, mikä hyödyttää ydinjätteiden sijoitustutkimuksia kallioperään sekä yleensä kalliorakentamista Etelä-Suomessa.

6.7 Ydinjätehuoltoon liittyvä yhteiskuntatieteellinen tutkimus

6.7.1 Turvallisuuden hallinta Suomen ja Ruotsin ydinjäteregeimeissä – SAFER (Hanke 31)

Matti Kojo, Markku Lehtonen, Mika Kari, Tuija Jartti, Tuuli Vilhunen, Anna-Riikka Aarnio, Anna Oksa, Tampereen yliopisto

(1) Kansalaisjärjestöjen rooli lisensoinnissa

Tämä osatehtävä tutki kansalaisosallistumista Ruotsin ja Suomen käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituksen sääntelyprosessiin kansalaissäätelyn näkökulmasta. Analyysin kohteena olivat jätehuollon institutionaaliset puitteet keskittyen kansalaisjärjestöjen rooliin näissä maissa, joita pidetään edelläkävijöinä käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituksessa. Aineisto käsitti jätehuoltoyhtiöiden ja turvallisuusviranomaisten virallisia dokumentteja, minkä lisäksi tarkasteltiin myös kansalaisjärjestöltä ja maallikoilta saatua informaatiota. Analyysissä päädyttiin siihen, ettei yhtenäistä pohjoismaista mallia loppusijoitukselle ole, vaan kansalaissääntely eroaa näiden kahden maan välillä. Kansalaissääntely on paremmin vakiintunut Ruotsissa, missä institutionaaliset järjestelyt ovat kompleksisemmat ja avoimemmat kansalaisyhteiskunnan toimijoille, ja missä ydinvoima on kiistanalaisempi kysymys kuin Suomessa. Tämän seurauksena Ruotsin kansalaissääntely oli enemmän liberaalin mallin mukainen, kun taas Suomessa kansalaisjärjestöt joutuivat pääsääntöisesti toimimaan varsin teknokraattisen sääntelyprosessin ulkopuolella. Tutkimus tuotti tietoa kansalaissäätelyn tilasta Suomessa tulevan päätöksenteon tueksi. Kansalaissääntely voi tarjota käyttökelpoisen kontribuution säätelyn kohteiden toimintaan, toimintaa hallinnoivien viranomaisten toimintatapoihin ja sääntelyyn, sekä metatason säätelyyn, joka kattaa koko hallinnollisen järjestelmän.

(2) Keskustelu luvitusprosesseista sanomalehdissä

Tässä osatehtävässä vertailtiin mediahuomiota käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituksen luvitusprosessille suomalaisessa ja ruotsalaisessa sanomalehtiaineistossa vuosina 2008–2015. Pitkittäistutkimuksessa, johon oli yhdistetty sisällönanalyysi, analysoitiin juttujen aiheita, argumentaation sävyä ja esiintyneitä puhujia *Helsingin Sanomissa*, *Aamulehdessä*, *Dagens Nyheterissä* and *Svenska Dagbladetissa*. Vertailevan tutkimuksemme keskeinen havainto oli, että puhujien osalta Ruotsin

ydinjäteregeimi synnytti monipuolisempaa keskustelua lehdistössä kuin Suomen ydinjäteregeimi. Puhujien moninaisuus julkisessa keskustelussa voidaan nähdä eduksi poliittiselle päätöksenteolle, joka koskee kiistanalaista teknologiaprojektia. Erityisen kiinnostavia ovat erot asiantuntijoiden ja kansalaisjärjestöjen rooleissa ja näkyvyydessä puhujina näiden maiden välillä. Ruotsissa edellä mainitut toimijaryhmät saivat mediahuomiota useammin kuin Suomessa. Havainnot osoittavat, että yhteiskunnallinen paine ydinvoimaan ja loppusijoitukseen kriittisesti suhtautuvilta tahoilta on heikompi Suomen ydinvoimamyönteisessä kontekstissa, mikä osaltaan auttaa ymmärtämään loppusijoitushankkeen luvitusprosessin sujuvaa etenemistä. Ruotsissa sitä vastoin mediahuomio näyttäisi vahvistavan loppusijoituskysymyksen kriittistä käsittelyä.

(3) Käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoitukseen liittyvät eettiset kysymykset sanomalehdissä

Osatehtävän tavoitteena oli verrata suomalaisia ja ruotsalaisia sanomalehdissä käytyä keskustelua käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituksesta oikeudenmukaisuuden näkökulmasta. Tutkimuksessa kehitettiin olemassa olevaan kirjallisuuden perustuva luokittelujärjestelmä, jota käytettiin aineiston (uutiset ja mielipidekirjoitukset) sisällönanalyysissä. Pitkittäistutkimus käsittää ajanjakson 2008–2015. Aineisto kerättiin neljästä johtavasta sanomalehdestä Ruotsissa ja Suomessa: *Dagens Nyheter*, *Svenska Dagbladet*, *Helsingin Sanomat* ja *Aamulehti*. Analyysissä kävi ilmi, että oikeudenmukaisuuskysymyksiin kohdistunut huomio vaihteli luvitusprosessin tapahtuminen mukaan ja prosessin ulkopuolisten, mutta prosessiin liittyvien tapahtumien tuoman huomion mukaan. Temaattisesti, distributiivinen ja proseduaalinen oikeudenmukaisuus olivat useimmin mainittuja kategorioita uutisjutuissa, joissa teollisuus määritteli agendaa painottaen turvallisuutta, tietoa ja prosessiin liittyviä asioita. Sukupolvien väliseen oikeudenmukaisuuteen liittyvät asiat saivat huomiota yleisön mielipidekirjoituksissa erityisesti Suomessa. Väitämme, että ydinjätehuoltoa koskevien eettiset näkökohtien ei pitäisi nojautua vain asiantuntijoiden näkemyksiin ja on epärealistista olettaa, että teollisuus ja asiantuntijat edustavat riittävästi yhteiskunnan arvoja ilman laajempaa yhteiskunnallista keskustelua loppusijoitukseen liittyvistä eettisistä näkökohdista.

(4) Loppusijoitukseen liittyvät eettiset näkökulmat laitoksen sijoituskunnissa: asukaskysely Pyhäjoella ja Eurajoella

Osahankkeen tavoite oli tutkia kuinka kahden suomalaisen ydinvoimakunnan asukkaat näkevät eettiset kysymykset, jotka liittyvät toiseen loppusijoituslaitokseen, jonka Fennovoima voi joutua rakentamaan. Aineisto (N=454) kerättiin puhelinhaastatteluina Pyhäjoella ja Eurajoella (mukaan lukien Luvia). Pyhäjoella kysely toteutettiin 30.12.2016 ja 6.1.2017 välisenä aikana ja Eurajoella 29.11.2016 ja 5.1.2017 välisenä aikana. Tutkimus osoitti, että kyselyyn vastanneet korostivat proseduraalista oikeudenmukaisuutta ja epäluottamusta Eurajoella, kun taas Pyhäjoella sukupolven sisäiseen epäoikeudenmukaisuuteen liittyvät huolet olivat etusijalla. Yllättäen sukupolvien välinen oikeudenmukaisuus nähtiin samalla tavalla molemmissa kunnissa, mikä viittaisi siihen, että huolimatta vuosikymmenten ajan jatkuneesta viestinnästä Eurajoella siellä ei ole kehittynyt erityistä ymmärrystä tulevia sukupolvia kohtaan. Lisäksi huolimatta siitä, että Eurajoella on aikaisempaa kokemusta ydinjätehuollosta, se ei vahvistanut paikallista hyväksyntää toista loppusijoituslaitosta kohtaan. Väitämme, että näiden suomalaisten ydinvoimakuntien asukkaat kokevat huolta ympäristöllisestä, poliittisesta ja sosiaalisesta epäoikeudenmukaisuudesta, mikä liittyy Fennovoiman loppusijoituslaitoksen paikanvalintaan. Mielestämme kuntien näkemyksiä tulisi pohtia aiemmin suunniteltaessa laajennusta, jotta tuettaisiin oikeudenmukaista paikanvalintaprosessi ja vältettäisiin kokemuksia epäoikeudenmukaisuudesta ja epäluottamuksesta.

(5) Sosiaalinen toimilupa (Social license to operate – SLO) ydinjätehuollossa

Osatehtävässä tarkasteltiin sosiaalinen toimilupa (SLO) -käsitteen hyödyllisyyttä ydinjätehuollossa Suomessa, Ranskassa ja Ruotsissa. Työ pohjautui ennen kaikkea SLO:ta ja paikallisyhteisöille etenkin ydinjätektorilla tarjottavia tukipaketteja koskevaa kirjallisuutta. Työssä hyödynnettiin lisäksi kirjoittajien aiempia tutkimuksia SLO:sta etenkin kaivosalalla, sekä aiempia ydinjäte- ja energia-alan julkaisuja.

Vaikka yksikään kolmesta tapaustutkimusmaasta ei ole käyttänyt SLO:n käsitettä ydinjätehuollossaan, SLO:ta voidaan soveltaa tutkimuskäsitteenä, joka auttaa ymmärtämään menestyksekkään ydinjätehuollon ehtoja kussakin tapaustutkimuksen kohteena olevassa hankkeessa. Siinä missä Ranskan loppusijoitushankkeen on ollut vaikea saavuttaa edes alhaisimpia SLO:n tasoja, Suomen ja Ruotsin hankkeet ovat eittämättä päässeet institutionalisoidun luottamuksen tasolle, jota soveltamalla SLO-kirjallisuudessa yleinen tarkastelukehys pitää korkeimpana sosiaalisen

toimiluvan asteena. Myös kunnille suunnatut tukipaketit on näin ollen otettu vastaan hyvin erilaisin tavoin kolmessa kohdemaassamme. Ranskassa tuki on yleisesti nähty keinona varmistaa paikallisyhteisön tuki ja SLO hankkeelle. Erityisesti paikallistason toimijat ovat usein kuvanneet tukea 'lahjontana', joskin toisinaan myös oikeutettuna sellaisena. Suomessa ja Ruotsissa syytteet 'lahjonnasta' ovat olleet harvinaisia. Etenkin Suomen ja Ruotsin tapausten vertaaminen nostaa esiin liiallisen luottamuksen mahdolliset haitat, sekä vastaavasti epäluottamuksen ja epäluulon mahdolliset edut rakentavan 'kansalaisvalvonnan' (civic vigilance) perustana.

Tutkimus kiinnittää huomiota tarpeeseen laajentaa SLO-teoriaa ja käsitteistöä siten, että se sisällyttäisi luottamuksen moniulotteisuuden sekä epäluottamuksen ja epäluulon mahdolliset edut. SLO:n roolia ydinjätehuollossa koskevassa työssä tulisi kiinnittää myös lisää huomiota maakohtaisiin taustaolosuhteisiin, kuten isäntäpaikkakunnan aiempaan kokemukseen ydinvoima-alan hankkeista, kansalaisten luottamukseen julkisiin ja yksityisiin instituutioihin, sekä 'ideologiseen' luottamukseen yhteiskunnan 'meta-instituutioihin', kuten valtio, markkinat, paikallisyhteisöt ja erilaiset demokratiamallit. Esimerkiksi ranskalaisessa valtiokeskeisessä poliittisessa kulttuurissa pohjoismaistyylliset paikallisesti neuvotellut tukipaketit olisi auttamatta katsottu epäoikeutetuiksi. Jotta SLO voisi toimia ydinjätehuololle aidosti hyödyllisenä käsitteenä, sitä tulisi kehittää etenkin kahden teeman osalta: 1) sosiaalisen ja lakisääteisen lupajärjestelyn väliset suhteet ja 2) paikallistason toiminnan ja kansallisen tason päätöksenteko- ja luvitusprosessien välinen vuorovaikutus.

(6) Sijoituskuntien lähestymistavat käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoitushankkeeseen Eurajoella ja Östhammarissa

Osatehtävän tavoitteena oli vertailla laitoksen sijoituskuntien lähestymistapoja käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoitushankkeeseen Eurajoella ja Östhammarissa. Metodina oli vertaileva tapaustutkimus. Aineisto koostui kuntien toimielinten dokumenteista. Kunnat perustivat erilaisia toimielimiä seuraamaan ja valvomaan paikanvalintaa ja laitoksen suunnittelua. Tulokset osoittavat että Eurajoki ja Östhammar ovat omaksuneet erilaiset lähestymistavat. Ruotsissa Östhammarin kunta on omaksunut roolin, jossa kunta esittää vaatimuksia toimeenpanijalla ja viranomaisille ja siten ikään kuin "venyttää" ja haastaa edellä mainittuja tahoja. Kunta pyrkii myös aktiivisesti osallistamaan yleisöä ja paikallisia toimijoita projektin suunnittelussa. Suomessa Eurajoki on omaksunut hiljaisemman roolin, joka nojaa luottamukseen turvallisuusviranomaiseen ja pyrkii ensisijaisesti pitämään huolta kuntataloudesta.

Tutkimus tarjoaa tietoa valintoihin, jotka koskevat kunnan ja ydinjäteregeihin suhteiden kehittämistä. Tutkimus auttaa myös tarkastelemaan kriittisesti nykyisiä vuorovaikutustoimia kunnissa.

6.8 Ydinjätehuollon infrahankkeet

6.8.1 Radiological Laboratory Commissioning – RADLAB (Hanke 32)

Wade Karlsen, Seppo Tähtinen, Kimmo Rämö, Ilkka Palosuo, Mika Jokipii, Tommi Kekki, Petri Hakulinen, Jarmo Siivinen, Tuomo Lyytikäinen, Risto Pitkäinen, Aku Itälä, Pekka Moilanen, Marko Paasila, Anumaija Leskinen, Emmi Myllykylä, Tiina Heikola, Tiina Lavonen, Jari Lydman, Marke Mattila, Johanna Lukin, Jaana Rantanen, Joonas Järvinen, Kirsti Helosuo, Jori Helin, Merja Tanhua-Tyrkkö, Pasi Väisänen, Unto Tapper, Aki Toivonen, VTT

Ydinsektorin turvallinen tutkimus liittyy radioaktiivisiin materiaaleihin edellyttäen erikoistiloja, ja voimakkaasti radioaktiiviset materiaalit kuumakammioita, joissa materiaaleja käsitellään etänä raskaiden gammasäteilysuojauksen sisällä. RADLAB-projektin päätavoite oli suunnitella ja toteuttaa kuumakammiot ja radiologinen kuumalaboratorio osana radioaktiivisten materiaalien tutkimusinfrastruktuurin uudistusta. Työ on koostunut uuden ydinturvallisuustalon (YTT) tärkeiden laiteinvestointien suunnittelusta ja toteutuksesta, laboratorion henkilöstön teknisestä koulutuksesta sekä uuden laboratorion valmiiksi saattamisesta ja käyttöönotosta. KYT/SAFIR 2018 ohjelman aikana tutkimusinfra uudistusta on rahoitettu yhteisesti KYT:in ja SAFIR:in kautta osoituksena, että kyseistä tutkimusinfraa hyödynnetään sekä ydinjätehuollon että ydinvoimalaitosten turvallisuuden tutkimuksessa.

Uusien radiologisen tutkimuksen tilojen suunnittelu ja toteutus koostuivat teknisten vaatimusten määrittämisestä ja ohjaamisesta osana YTT-rakennuksen teknistä suunnittelua. Vuonna 2015 YTT:n rakennusprojekti huipentui, mikä edellytti kaikkien laboratoriotilojen kiinteiden ja irrallisten kalusteiden sekä talojärjestelmien yksityiskohtien määrittelemisen. Vuoden 2016 alussa VTT:n työntekijät pääsivät muuttamaan vastavalmistuneisiin toimistotiloihin, ja kesäkuussa samana vuonna laboratorion tilat luovutettiin VTT:lle. Tutkimuslaitteiden siirto uusiin tiloihin käynnistettiin silloin ja laboratorion radiologinen luvitusprosessi aloitettiin. STUK myönsi käyttöluvan laboratoriotilalle tammikuussa 2017. Samanaikaisesti edettiin uusien

kuumakammioiden teknisessä suunnittelussa, valmistuksessa ja asennuksessa yhteistyössä Isotope Technologies Dresden (ITD) kanssa. Kuumakammioiden asennus valmistui vuonna 2017, sisältäen VTT:n omien suurten laitteiden asennuksen kuumakammioihin. Asennuksen jälkeen ITD koulutti kuumakammioiden käyttäjät. STUK hyväksyi käyttöluvan laajennuksen kattamaan kuumakammiot alkuvuonna 2018.

Rinnakkaisesti kuumakammioiden suunnittelun ja valmistumisen kanssa, kehitettiin etäkäyttötaitoja ja suoritettiin kammiossa oleville laitteille tarvittavia muutoksia, jotta ne soveltuvat etäkäyttöön. Osaamista uuden infran tarkoituksenmukaiseen käyttöön kehitettiin. Kammiossa olevien laitteiden etäkäytettävyyttä (manipulaattoreiden ulottavuus, näkyvyys ikkunoiden läpi, jne.) tutkittiin myös graafisen mallinnuksen avulla. Myös puoliautomaattisten robottien soveltavuutta etäkäsitteilyyn arvioitiin yleisellä tasolla, erityisesti arvioimalla robotiikan soveltavuutta paineastian seurantanäytteiden (surveillance) kapselien avaamiseen koneistamalla verrattuna perinteiseen CNC-jyrsimen käyttöön. Puoliautomaattisia laite-ehdokkaita verrattiin myös dimensiomittausta sekä murtumissitkeyskoesauvojen esiväsytystä varten. Vuonna 2016 VTT:n kuumakammiossa työskentelevä insinööri vieraili muutaman kuukauden Paul Scherrer Institute (PSI) -laboratoriossa Sveitsissä, tavoitteena kehittää työskentelytaitoja kuumakammio-olosuhteissa.

Uusien tutkimuslaitteiden hankinta tulevaan radiologiseen laboratorioon oli myös keskeinen osa tutkimusinfrastruktuurin uudistamista. Valtaosa laitteiden hankintakustannuksista katettiin investointiavustuksella, joka rahoitettiin RADINFRA-projektin kautta. Uudet laitteet luovat valmiudet tutkia ja testata erilaisten radioaktiivisten materiaalien mekaanisia ominaisuuksia, niiden radiokemiallisia ominaisuuksia sekä karakterisoida niiden mikrorakenteet ja koostumusjakaumat. Tutkimuksen avulla voidaan kattavasti arvioida käytössä olevien ydinvoimalaitosten ja ydinjätehuoltojärjestelmien rakennemateriaalien turvallinen käyttö, ja materiaalien suorituskyvyn mallintamista voidaan kehittää ja menetelmiä validoida. Tutkimusohjelman aikana kirjoitettiin monta kattavaa raporttia eri laitteiden toiminnasta ja hyödynnettävyydestä.

Tutkimusohjelman aikana hankittiin seuraavat tutkimuslaitteet kuumakammioon asennettavaksi: puoliautomaattinen kovuusmittauslaite, pieni instrumentoitu iskuvasara puoliautomaattisella lämpötilan säädöllä ja sauvojen syötöllä, yleislaite mekaaniseen testaukseen varustettuna ympäristökammioilla, joka mahdollistaa kokeet eri lämpötiloissa, puoliautomaattinen murtumissitkeyssauvojen esiväsytyslaite,

multiaksaalinen CNC-jyrsin, puoliautomaattinen tarkka dimensiomittauslaite optisella ja kosketukseen perustuvalla tekniikoilla varustettuna, metallografisten näytteiden valmistuslaitteita sekä optinen käänteinen valomikroskooppi metallisille näytteille. Teknisen tukitoiminnan laitteiden (koneistus- ja hitsauslaitteet) lisäksi hankittiin myös muita laitteita, joita voidaan tarpeiden mukaan suojata paikallisesti radioaktiivisten materiaalien testausta varten. Näitä ovat esimerkiksi iso instrumentoitu iskuvasara puoliautomaattisella lämpötilan säädöllä ja sauvojen syötöllä, sekä analyttinen pyyhkäisyelektronimikroskooppi (SEM). Laiteinvestointeihin kuului myös uuden laboratorion radioaktiivisuuden seurantajärjestelmä, henkilömonitorit ja dosimetrijärjestelmä, jotka asennettiin talon valmistumisen yhteydessä. Radiokemian ja ydinjätehuollon tutkimuksen valmiuksia parannettiin seuraavilla tutkimuslaitteilla: kolmiaksaalinen mekaaninen puristuslaite bentoniitin tutkimukseen, nestekidetuikeilmaisoin, induktiivisesti kytketty plasma – optinen emissiospektrometri (ICP-OES), alfaspektrometri, mikroaaltouuni näytteiden hajottamiseen ja aerosolipartikkelilaskuri korkealla resoluutiolla.

Joitakin tutkimus- ja testausjärjestelmiä ei ole kaupallisesti saatavilla vaan ne vaativat pikemmin räätälöityä suunnittelua. Näiden laitteiden suunnittelu ja valmistus tehdään niiden asiantuntijoiden avulla, jotka tulevat hyödyntämään niillä tuotettuja tutkimustuloksia. Laitteistot valmistetaan itse tehdyistä ja/tai hankituista osista. Ohjelman neljän vuoden aikana valmistettiin ja asennettiin uusi autoklaavi- ja vesipiirijärjestelmä, jossa voidaan suorittaa tutkimuksia radioaktiivisille materiaaleille simuloituissa ydinvoimalaitosten primaari- ja sekundaaripiirien olosuhteissa. Ison mekaanisen testauslaitteen paikallinen säteilysuojelujärjestelmä suunniteltiin, ja sen prototyyppi rakennettiin. Uusien laitteiden muutostarpeet etäkäyttöä varten kuumakammiossa tunnistettiin, kuten tarvittavat muutostyöt elektronisuihkuhitsauslaitteen (EBW) ja kipinätyöstölaitteen (EDM) osalta. Edellä mainitut laitteet ovat tärkeitä erilaisten metallisen kappaleiden hitsausta ja leikkausta varten, joka puolestaan on erityisen tärkeä näytteiden uusiokäyttöä varten rekonstituutieteekniikkaa hyödyntäen. Jodikaasun suodatuksen testauksen erikoislaitteiden uudistus aloitettiin vuonna 2018. Laitteistoa käytetään käytössä olevien ydinvoimalaitosten radioaktiivisen kaasun suodatusjärjestelmän toimivuuden arvioimiseen.

Ydinturvallisuustalon laboratorion käyttö edellyttää myös tukijärjestelmiä. Ohjelman aikana tukijärjestelmiä toteutettiin kolmella aihealueella: laboratorion radioaktiivinen jätteenkäsittely, radioaktiivisten tutkimusmateriaalien logistiikka ja järjestelmällinen näytteiden varastointi. Nämä toiminnot sijaitsevat talon

kellarikerroksessa. Kuiva jäte muodostuu pääasiallisesti käyttökeltomasta metalli-jäämästä ja kontaminoidusta jätteestä (paperia, hanskoja, jne.). Niiden asianmu-kaista lajittelua ja lyhytaikaista väliarastointia varten on rakennettu suojattu alue kellariin, johon on hankittu etäohjattava nosturi, jossa on 200 litran jätetynnyreitä varten tehty tarrain. Nestemäisten ja märkien jätteiden käsittelyä varten hankittiin Platom Oy:ltä räätälöity hanskakaappi, jossa on haihdutusjärjestelmä haihtuville aineille ja kiinteytysvälineitä sakoille sekä ionivaihtohartsien käytön vaihtoehto ra-dioaktiivisille liuoksille. Näytteiden varastointia varten hankittiin ITD:n kautta räätälöity gammasäteilyltä suojattu alfanumeerinen varastolaatikosto, joka on varustettu näytekäsittelyjärjestelmällä. Koko järjestelmä on asennettu kuumakammioon ja se muodostaa oman varastokuumakammion. Näyteinventaarion kirjanpitoa varten hankittiin myös räätälöity Pergament-tietokantajärjestelmä, joka mahdollistaa näyt-teiden sijainnin seurannan lisäksi kaikkien tarvittavien tietojen liittämistä sähköi-sesti jokaiseen näytteeseen ml. sen tytär-näytteet, kuten rekonstituutiteknikalla valmistetut uudet koesauvat.

Voidaan todeta, että valtaosa uudesta laboratoriosta ja kuumakammiojärjestel-mästä ovat nyt käyttövalmiit, ja ne tarjoavat laajan tutkimusvalmiuksien valikoiman. Kammioiden sisällä olevat laitteet mahdollistavat erilaisten näytteiden valmistuksen radioaktiivisista materiaaleista. Moninaiset mekaaniset testauslaitteet ovat käytet-tävissä materiaalien murtumissitkeyden, iskusitkeyden, mekaanisten ominaisuuksien (murtolujuus ja venymä jne.) sekä kovuuden määrittämiseen. Erilaiset optiset ja analyttiset elektronimikroskoopit mahdollistavat materiaalien mikrorakenteiden ja alkuaineiden jakaantumisen tutkimisen makroskaalasta aina nano-resoluutioon asti. Erilaisilla spektrometreillä voidaan mitata radionuklidien alfa-, beta- ja gamma-säteily sekä määrittää alkuaineiden ja isotooppien koostumukset laajasti myös erittäin pieniin pitoisuuksiin asti. Monipuolinen valikoima nykyaikaisia tutkimus-välineitä luo laajat valmiudet ja mahdollistaa osaamisen, joka tarvitaan tukemaan turvallista ydinjätehuolta ja turvallista ydinvoimaloiden käyttöä. Jo kahden viime vuoden aikana moni SAFIR- ja KYT-projekti on suorittanut kokeellista tutkimusta uu-den laboratorion laitteilla. Näistä mainittakoon THELMA ja BRUTE reaktorien raken-nemateriaalien eheyden tutkimukseen liittyen, CATFIS fissiotuotteiden aerosolien kemiaan ja kulkeutumiseen liittyen, HILLI-14, jossa tutkitaan C-14-päästöä metalli-sista käytöstäpoiston jätteistä, ja THEBES liittyen savipuskurin turpoamiseen ydin-jätehuollon sovelluksissa.

Liite 1 KYT2018 hankkeet 2015–2018

	Aika	Hanke	Organisaatio ²⁵
Ydinjätehuollon teknologiat			
1	2015–2018	Kehittyneet polttoainekierrot – Uudet säädettävät erotusmateriaalit (SERMAT)	HYRL
2	2015–2018	Kehittyneet polttoainekierrot – Skenaario- ja inventaarilaskenta (KOSKI)	VTT
3	2018	Vaikeasti mitattavien radionuklidien mittaamenetelmät (VAMMA)	VTT
Turvallisuusperustelu			
4	2015–2018	TURMET ²⁶ – Turvallisuusperustelun metodiikan systematisointi, osa 1	VTT
5	2015–2018	TURMET – Turvallisuusperustelun metodiikan systematisointi, osa 2	Aalto
Puskuri- ja täyteaineiden toimintakyky			
6	2015–2018	THEBES ²⁷ – THMC Behaviour of the Swelling Clay Barriers	Aalto
7	2015–2018	THEBES – THMC Behaviour of the Swelling Clay Barriers	VTT
8	2015–2018	THEBES – THMC Behaviour of the Swelling Clay Barriers), X-ray tomography and modelling	JYFL
9	2015–2018	THEBES – THMC Behaviour of the Swelling Clay Barriers	Numerola
10	2015–2018	Bentoniitin eroosio ja radionuklidien vuorovaikutus (BENTO)	HYRL
11	2015–2018	Bentonite swelling pressure (UEFBENT)	UEF
Kapselin toimintakyky			
12	2015–2018	KAPSELI ²⁸ – Experimentally verified model based predictions for the integrity of the copper overpack (PRECO)	VTT
13	2015–2018	KAPSELI – Kuparikapselin mekaaninen lujuus (MECHACOP)	Aalto
14	2015–2018	KAPSELI – Reaktiotuotteiden vaikutus kuparin korroosioon loppusijoituksen olosuhteissa (REPCOR)	Aalto
15	2015–2018	KAPSELI – Mikrobiologisen toiminnan vaikutus kuparin korroosioon loppusijoituksen hapettomissa olosuhteissa (BASUCA)	VTT
16	2015–2018	KAPSELI – Loppusijoituksen aerobisen vaiheen mikrobiologinen korroosio (MICOR)	VTT

²⁵ Aalto = Aalto-yliopisto, GTK = Geologian tutkimuskeskus, HYRL = Helsingin yliopiston radiokemian yksikkö, JYFL = Jyväskylän yliopiston fysiikan laitos, Numerola = Numerola Oy, TTY = Tampereen Teknillinen yliopisto, TY = Tampereen Yliopisto, UEF = Itä-Suomen yliopisto, VTT = Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy

²⁶ Koordinoitu hanke TURMET

²⁷ Koordinoitu hanke THEBES

²⁸ Koordinoitu hanke KAPSELI

Mikrobiologian vaikutukset			
17	2015–2018	MILORI ²⁹ – Matala- ja keskiaktiivisen jätteen loppusijoituksen mikrobiologia (MAKERI)	VTT
18	2015–2018	MILORI – Matala- ja keskiaktiivisen metallijätteen mikrobiologinen korroosio (CORLINE)	VTT
19	2015–2018	MILORI – Mikrobiyhteisöjen rikkimetabolian loppusijoitusolosuhteissa (GEOBIOKIERTO)	VTT
20	2015–2018	Ravinteet, energia ja kaasut kalliobiosfäärissä (RENGAS)	GTK
Muut turvallisuustutkimukset			
21	2015–2018	Radionuklidien kulkeutuminen kallioperässä; Kallion in situ tutkimukset (RAKU)	HYRL
22	2015–2018	C-14 vapautuminen metallijätteestä (HIILI-14)	VTT
23	2015–2017	Rakovirtaus-, matriisidiffuusio- ja sorptiomallinnus hila-Boltzmann menetelmällä (JYFLKYT)	JYFL
24	2015–2018	Radiohiilen kemialliset muodot ja sorptio kallioperässä (C14ROCK)	HYRL
25	2015–2017	Applicability of Geopolymers in Nuclear Waste Management (GeoP-NWM)	VTT
26	2015–2018	Ydinjätteen riskien arviointiin soveltuvan radioekologisen mallintamisen kehittäminen maa- ja vesiekosysteemeissä (YRMA)	UEF
27	2015–2016, 2018	Biosfäärimallinnuksen vaihtoehtoiset menetelmät ja niiden arviointi (VABIA)	TTY
28	2015–2016	Kallion rakopintojen mekaaniset ominaisuudet (KARMO II)	Aalto
29	2017–2018	Kallion rakopintojen mekaaniset ominaisuudet (KARMO III)	Aalto
30	2015–2018	Rakosimulaattori, joka kunnioittaa rakojen mitattuja pituus- ja suuntajakaumia (ROSA)	GTK
Ydinjätehuolto ja yhteiskunta			
31	2015–2018	Governing Safety in Finnish and Swedish Nuclear Waste Regimes (SAFER)	TY
Ydinjätehuollon infrahankkeet			
32	2016–2018	Radiological Laboratory Commissioning (RADLAB)	VTT

²⁹ Koordinoitu hanke MILORI

Liite 2 KYT2018 julkaisut ja opinnäytteet 2015–2018

Arvojulkaisut³⁰

Aaltonen, P., Yagodzinsky, Y., Saukkonen, T., Kilpeläinen, S., Tuomisto, F., & Hänninen, H. 2015. Role of excessive vacancies in transgranular stress corrosion cracking of pure copper. *Corrosion Reviews*, 33(2015)6, 487-500. Article available online: <https://doi.org/10.1515/correv-2015-0047>.

Abed, A.A. & Sołowski, W.T. 2017. A study on how to couple thermo-hydro-mechanical behaviour of unsaturated soils: Physical equations, numerical implementation and examples *Computers and Geotechnics*, vol. 92, pp. 132-155. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2017.07.021>.

Abed, A.A. & Sołowski, W.T. 2019. Applications of a New THMC Coupled Code "Thebes". Published in *Environmental Geotechnics* 1.3.2019. <https://doi.org/10.1680/jenge.18.00083>.

Akinwunmi, B., Sun, L., Hirvi, J.T., Kasa, S. & Pakkanen, T.A. 2019. Influence of temperature on the swelling pressure of bentonite clay, *Chem. Phys* 516 (2019) 177.

Bomberg, M., Lamminmäki, T. & Itävaara, M. 2015. Estimation of microbial metabolism and co-occurrence patterns in fracture groundwaters of deep crystalline bedrock at Olkiluoto, Finland – *Biogeosciences Discuss.*, 12, 13819-13857, 2015.

Bomberg, M., Raulio, M., Jylhä, S., Mueller, C. W., Höschen, C., Rajala, P., Purkamo, L., Kietäväinen, R., Ahonen, L. & Itävaara, M. 2017. CO₂ and carbonate as substrate for the activation of the microbial community in 180 m deep bedrock fracture fluid of Outokumpu Deep Drill Hole, Finland. *AIMS Microbiology*, 2017, 3(4): 846-871.

Carpén, L., Rajala, P. & Bomberg, M. 2015. Microbially Induced Corrosion in Deep Bedrock. *Advanced Materials Research* Vol. 1130 (2015) pp 75-78.

³⁰ Julkaisujen luokittelu eri kategorioihin (arvojulkaisut, konferenssijulkaisut ja työraportit, opinnäytteet) on tehty hankepäälliköiden ilmoitusten perusteella. Arvojulkaisuille tarkoitetaan tässä vertaisarvioituja artikkeleita vakiintuneissa tieteellisissä lehdissä.

Carpén, L., Rajala, P. & Bomberg, M. 2018. Corrosion of copper in anoxic ground water in the presence of SRB. *Corrosion Science and Technology*, 17 2018(4), 147-153.

Dzugala, M., Sirkiä, J., Uotinen, L. & Rinne, M. 2017. Pull Experiment to Validate Photogrammetrically Predicted Friction Angle of Rock Discontinuities. In *Symposium of the International Society for Rock Mechanics* (pp. 378-385). (Procedia engineering; Vol. 191). Elsevier. *Procedia Engineering*, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.194>.

Elo, O., Müller, K., Ikeda-Ohno, A., Bok, F., Scheinost, A. C., Hölttä, P. & Huittinen, N. 2017. Batch sorption and spectroscopic speciation studies of neptunium uptake by montmorillonite and corundum. *Geochimica and Cosmochimica Acta* 198 (2017) 168–181.

Elo, O., Hölttä, P., Kekäläinen, P., Voutilainen, M. & Huittinen, N. 2019. Neptunium(V) transport in granitic rock: A laboratory scale study on the influence of bentonite colloids, *Applied Geochemistry* 103, 2019, 31-39.

Forsström, A., Luumi, L., Bossuyt, S. & Hänninen, H. 2017. Localisation of plastic deformation in friction stir and electron beam copper welds, *Materials Science and Technology*, (2017) Article available online: <http://dx.doi.org/10.1080/02670836.2016.1243337>.

Harjupatana, T., Alaraudanjoki, J. & Kataja, M. 2015. X-ray tomographic method for measuring three-dimensional deformation and water content distribution in swelling clays. *Appl. Clay Sci.* 114, 386-394.

Huttunen-Saarivirta, E., Ghanbari, E., Mao, F., Rajala, P., Carpen, L. & Macdonald, D.D. 2018. Kinetic properties of the passive film on copper in the presence of Sulfate-Reducing Bacteria. *Journal of The Electrochemical Society*, J. Electrochem. Soc. 165(9): C450-C460.

Huttunen-Saarivirta, E., Rajala, P. & Carpen, L. 2016. Corrosion behaviour of copper under biotic and abiotic conditions in anoxic ground water: electrochemical study. *Electrochimica Acta*, Vol. 203, pp. 350-365.

Huttunen-Saarivirta, E., Rajala, P., Bomberg, M. & Carpén, L. 2017. Corrosion of copper in oxygen-deficient groundwater with and without deep bedrock micro-organisms: characterisation of microbial communities and surface processes, *Applied Surface Science*, 396: 1044-1057.

Huttunen-Saarivirta, E., Rajala, P., Bomberg, M. & Carpén, L. 2017. EIS study on aerobic corrosion of copper in ground water: influence of micro-organisms. *Electrochimica Acta* 240: 163–174.

Huttunen-Saarivirta, E., Rajala, P., Bomberg, M. & Carpén, L. 2017. Laboratory study of interactions between copper and the micro-organisms in oxic ground water environment. *Environmental Geotechnics*. In Press.

Huttunen-Saarivirta, E., Rajala, P., Bomberg, M. & Carpén, L. 2018. Copper micro-organism interactions in oxic groundwater. *Environmental Geotechnics*, Accepted – in press 2018.

Ikonen, J., Sardini, P., Siitari-Kauppi, M. & Martin, A. 2017. In situ migration of tritiated water and iodine in Grimsel granodiorite, part II: assessment of the diffusion coefficients by TDD modelling, *J Radioanal Nucl Chem* 2017, 311, 339-348.

Ikonen, J., Voutilainen, M., Söderlund, M., Jokelainen, L., Siitari-Kauppi, M. & Martin, A. 2016b. Sorption and diffusion of selenium oxyanions in granitic rocks. *Journal of Contaminant Hydrology* 192 203–211.

Ikonen, J., Sardini, P., Siitari-Kauppi, M., Martin, A. & Eichenberg, J. 2016a. The tritiated water and iodine migration in situ in Grimsel granodiorite. Part I: determination of the diffusion profiles. *J Radioanal Nucl Chem*, 310, pages 1041-1048.

Itävaara, M., Salavirta, H., Marjamaa, K. & Ruskeeniemi, T. 2016. Geomicrobiology and metagenomics of terrestrial deep subsurface microbiomes. In: Sariaslani, S. & Gadd, G.M. (eds.), *Advances in applied microbiology*. Elsevier. 94:1-77. <https://doi.org/10.1016/bs.aambs.2015.12.001>.

Järvinen, J., Matuszewicz, M. & Itälä, A. 2016. Methodology for studying the composition of non-interlamellar pore water in compacted bentonite. *Clay Minerals* Vol 51:2, pp. 173-187.

Kietäväinen, R., Ahonen, L., Niinikoski, P., Nykänen, H. & Kukkonen, I.T. 2017. Abiotic and biotic controls on methane formation down to 2.5 km depth within the Precambrian Fennoscandian Shield. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 202, 124-145.

Kietäväinen, R. & Purkamo, L. 2015. The origin, source and cycling of methane in deep crystalline rock biosphere. *Frontiers in Microbiology* 6, 725.

Kinnunen, P., Bomberg, M., Rajala, P. & Carpén, L. 2015. Industrial Views to Microbe-Metal Interactions in Sub-Arctic Conditions. 2015. *Advanced Materials Research Vol. 1130* (2015) pp 114-117.

Kutvonen, H., Rajala, P., Carpén, L. & Bomberg, M. 2015. Nitrate and ammonia as nitrogen sources for deep subsurface microorganisms. *Frontiers in Microbiology*. Frontiers Research Foundation, vol. 6, ss. 1079.

Kuva, J., Hellmuth, K.-H., Sardini, P. & Siitari-Kauppi, M. 2015. Verification of a simulation approach for estimating crack aperture using ¹⁴C-PMMA method J. Coupled Syst. Multiscale Dyn. 3 (4): 333-340 (2015).

Lavikainen, L.P., Hirvi, J.T., Kasa, S. & Pakkanen, T.A. 2016. Interaction of octahedral Mg(II) and tetrahedral Al(III) substitutions in aluminum-rich dioctahedral smectites, *Theor. Chem. Acc.* 135 (2016) 85.

Lehtonen, M., Kojo, M. & Litmanen, T. 2017. The Finnish success story in the governance of a megaproject: the (minimal) role of socioeconomic evaluation in the final disposal of spent nuclear fuel. In: Lehtonen, M., Joly, P.-B. & Aparicio, L. (Eds.) *Socioeconomic Evaluation of Megaprojects. Dealing with uncertainties*. Routledge. pp. 83–110.

Lempinen, J. & Lehto, J. 2016. Rate of Radiocarbon Retention onto Calcite by Isotope Exchange, *Radiochimica Acta* 104, 2016, 663–671.

Lempinen, J., Muuri, E., Lusa, M. & Lehto, J. 2018. Sorption of inorganic radio-carbon on iron oxides, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 316(2) (2018)717-723.

Litmanen, T., Kari, M., Kojo, M., & Solomon, B. 2017. Is There a Nordic Model of Final Disposal of Spent Nuclear Fuel? Governance Insights from Finland and Sweden. *Energy Research & Social Science*. Vol. 25, pages 19–30, <http://dx.doi.org/10.1016/j.erss.2016.10.009>.

Litmanen, T., Kojo, M., Kari, M., & Vesalainen, J. 2017. Does technical risk dialogue entail socioeconomic valuation? The case of scientific dispute over copper corrosion in a spent nuclear fuel disposal project. In: Lehtonen, M., Joly, P.-B. & Aparicio, L. (Eds.) *Socioeconomic Evaluation of Megaprojects. Dealing with uncertainties*. Routledge. pp. 134–158.

Lousada, C., Soroka, I., Yagodzinskyy, Y., Tarakina, N., Todoshchenko, O., Hänninen, H., Korzhaviy, P. & Jonsson, M. 2016. Gamma radiation induces hydrogen absorption by copper in water. *Scientific Reports* 6, Article number: 24234 (2016), 8 p.

Marja-Aho, M., Rajala, P., Huttunen-Saarivirta, E., Legat, A., Kranjc, A., Kosec, T. & Carpen, L. 2018. Copper corrosion monitoring by electrical resistance probes in anoxic groundwater environment in the presence and absence of sulfate reducing bacteria. *Sensors and Actuators A: Physical* Vol 274, pp. 252–261. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.03.018>.

Matusiewicz, M., Järvinen, J., Olin, M. & Muurinen, A. 2016. Microstructural features of compacted MX-80 bentonite after the long-time experiment. *MRS Advances*, 1(61), 4069–4074. <https://doi.org/10.1557/adv.2017.191>.

Matusiewicz, M., Pulkkanen, V.-M. & Olin, M. 2016. Influence of sample preparation on MX-80 bentonite microstructure. *Clay Minerals*, 51(2), 189–195.

Matusiewicz, M. & Olin, M. 2018. Comparison of microstructural features of three compacted and water saturated swelling clays: MX-80 bentonite, and Na- Ca-montmorillonite., *Clay Minerals*, (accepted).

Miettinen, H., Kietäväinen, R., Sohlberg, E., Numminen, M., Ahonen, L. & Itävaara, M. 2015. Microbiome composition and geochemical characteristics of deep subsurface high-pressure environment, Pyhäsalmi mine Finland. *Frontiers in Microbiology*. 6:1203. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.01203>.

Miettinen, H., Bomberg, M. & Vikman, M. 2018. Acetate activates deep subsurface fracture fluid microbial communities in Olkiluoto, Finland. *Geosciences*. 8(11), 399. doi.org/10.3390/geosciences8110399.

Muuri, E., Ikonen, J., Matara-aho, M., Lindberg, A., Holgersson, S., Voutilainen, M., Siitari-Kauppi, M. & Martin, A. 2016. Behavior of Cs in Grimsel granodiorite: sorption on main minerals and crushed rock. *Radiochimica Acta*, Volume 104, Issue 8, Pages 575-582.

Muuri, E., Siitari-Kauppi, M., Matara-aho, M., Ikonen, J., Lindberg, A., Qian, L. & Koskinen, L. 2017. Cesium sorption and diffusion on crystalline rock: Olkiluoto case study, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 311, 1, ss. 439-446.

Muuri, E., Matara-aho, M., Puhakka, E., Ikonen, J., Martin, A., Koskinen, L. & Siitari-Kauppi, M. 2018. The sorption and diffusion of ¹³³Ba in granitic rocks. *Applied Geochemistry*, Volume 89, February 2018, Pages 138-149.

Muuri, E., Sorokina, T., García, D., Grivé, M., Bruno, J., Koskinen, L., Martin, A. & Siitari-Kauppi, M. 2018. The in-diffusion of ¹³³Ba in granitic rock cubes from the Olkiluoto and Grimsel in-situ test sites. *Applied Geochemistry*, 92, 188-195.

Nuppenen-Puputti, M., Purkamo, L., Kietäväinen, R., Nyyssönen, M., Itävaara, M., Ahonen, L., Kukkonen, I. & Bomberg, M. 2018. Rare biosphere archaea assimilate acetate in Precambrian terrestrial subsurface at 2.2 km depth. *Geosciences* 8, 418, <https://doi.org/10.3390/geosciences8110418>.

Padovani, C., King, F., Lilja, C., Féron, D., Necib, S., Crusset, D., Deydier, V., Diomidis, N., Gaggiano, R., Ahn, T., Keech, P.G., Macdonald, D.D., Asano, H., Smart, N., Hall, D.S., Hänninen, H., Engelberg, D., Noel, J.J. & Shoesmith, D.W. 2017. The corrosion behavior of candidate container materials for the disposal of high level waste and spent fuel – A summary of the state of the art and opportunities for synergies in future R&D. *Corrosion Engineering Science and Technology*, 2017, 227-231.

Pohjola, J., Turunen, J., Lipping, T. & Ikonen, A.T.K. 2016. Probabilistic assessment of the influence of lake properties in long-term radiation doses to humans. *Journal of Environmental Radioactivity*, 164, November 2016, pp. 258-267.

Purkamo, L., Bomberg, M., Nyyssönen, M., Kukkonen, I., Ahonen, L. & Itävaara, M. 2015. Heterotrophic communities supplied by ancient organic carbon predominate in deep Fennoscandian bedrock fluids. *Microbial Ecology* 69, 319-332.

Purkamo, L., Kietäväinen, R., Miettinen, H., Sohlberg, E., Kukkonen, I., Itävaara, M. & Bomberg, M. 2018. Diversity and functionality of archaeal, bacterial and fungal communities in deep Archean bedrock groundwater. *FEMS Microbiology Ecology* 94, <https://doi.org/10.1093/femsec/fiy116>.

Purkamo L., Bomberg M., Kietäväinen R., Salavirta H., Nyyssönen M., Nupponen-Puputti M., Ahonen L., Kukkonen I. & Itävaara M. 2016. Microbial co-occurrence patterns in deep Precambrian fracture fluids. *Biogeosciences* 13, 3091-3108.

Purkamo, L., Bomberg, M., Nyyssönen, M., Ahonen, L., Kukkonen, I. & Itävaara, M. 2017. Response of deep subsurface microbial community to different carbon sources and electron acceptors during ~2 months incubation in microcosms. *Frontiers in Microbiology* 8, 232.

Rajala, P. & Bomberg, M. 2017. Reactivation of deep subsurface microbial community in response to methane or methanol amendment. *Front. Microbiol.* 8:431.

Rajala, P., Bomberg, M., Kietäväinen, R., Kukkonen, I., Ahonen, L., Nyyssönen, M. & Itävaara, M. 2015. Rapid reactivation of deep subsurface microbes in the presence of C-1 compounds. *Microorganisms* 3, 17-33.

Rajala, P., Bomberg, M., Vepsäläinen, M. & Carpén, L. 2017. Microbial fouling and corrosion of carbon steel in alkaline deep groundwater, *Biofouling*, 33(2): 195-209.

Rajala, P., Carpén, L., Vepsäläinen, M., Raulio, M., Huttunen-Saarivirta, E. & Bomberg, M. 2016. Influence of carbon sources and concrete on microbiologically influenced corrosion of carbon steel in subterranean ground-water environment, *Corrosion*, Vol. 72, No. 12, pp. 1565-1579, <https://doi.org/10.5006/2118>.

Rajala, P., Carpén, L., Vepsäläinen, M., Raulio, M., Sohlberg, E. & Bomberg, M. 2015. Microbially induced corrosion of carbon steel in deep groundwater environment: *Frontiers. Frontiers in Microbiology*, Vol. 6, pp. Article number 647.

Sardini, P., Caner, L., Mossler, P., Mazurier, A., Hellmuth, K.-H., Graham, R.C., Rossi, A.M. & Siitari-Kauppi, M. 2015. Calibration of digital autoradiograph technique for quantifying rock porosity using ¹⁴C-PMMA method, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 303(1), 2015, 11-23.

Small, J., Nykyri, M., Vikman, M., Itävaara, M. & Heikinheimo, L. 2017. The biogeochemistry of gas generation from low-level nuclear waste: Modelling after 18 years study under in situ conditions, *Applied Geochemistry*. Elsevier. Vol. 84 (2017), 360-372.

Sohlberg, E., Bomberg, M., Miettinen, H., Nyyssönen, M., Salavirta, H., Vikman, M., Pitkänen, P., Lamminmäki, T. & Itävaara, M. 2015. Revealing the unexplored fungal communities in deep groundwater of crystalline rock fracture zones in Olkiluoto, Finland, *Frontiers in Microbiology*. 6;573, <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.00573>.

Soler, J.M., Landa, J., Havlova, V., Tachi, Y., Ebina, T., Sardini, P., Siitari-Kauppi, M., Eikenberg, J. & Martin, A.J. 2015. Comparative modeling of an in-situ diffusion experiment in granite at the Grimsel Test Site, *Journal of Contaminant Hydrology* 179, 2015, 89-101.

Sun, L., Hirvi, J.T., Schatz, T., Kasa, S. & Pakkanen, T.A. 2015. Estimation of Montmorillonite Swelling Pressure: a Molecular Dynamics Approach, *J. Phys. Chem. C* 2015, 119, 19863.

Sun L., Ling, C.Y., Lavikainen, L.P., Hirvi, J., Kasa, S. & Pakkanen, T.A. 2016. Influence of Layer Charge and Charge Location on the Swelling Pressure of Dioctahedral Smectites. *Chem. Phys* 473 (2016) 40.

Tosoni, E., Salo, A. & Zio, E. 2017. Scenario analysis for the safety assessment of nuclear waste repositories: a critical review, *Risk Analysis*. 38(4): 755-776, 2018.

Tuovinen, T., Kasurinen, A., Häikiö, E., Tervahauta, A., Makkonen, S., Holopainen, T. & Juutilainen, J. 2016. Transfer of elements relevant to nuclear fuel cycle from soil to boreal plants and animals in experimental meso- and microcosms. *Sci Total Environ* 2016; 539:252-261.

Tuovinen, T., Makkonen, S., Holopainen, T., Kolehmainen, M. & Juutilainen, J. 2016. Non-linear transfer of elements from soil to plants: impacts on radioecological modelling. *Radiat Environ Biophys* 2016; 55:393-400.

Uurtio, V., Bomberg, M., Nybo, K., Itävaara, M. & Rousu, J. 2015. Canonical Correlation Methods for Exploring Microbe-Environment Interactions in Deep Subsurface. – Conference: Discovery Science 2015, At Banff, Alberta, Canada DS-2015.

Vilhunen, T., Kojo, M., Litmanen, T. & Taebi, B. 2019. Perceptions of justice influencing community acceptance of spent nuclear fuel disposal. A case study in two Finnish nuclear communities, The article will be published in *Journal of Risk Research* in 2019 (Accepted in November 2018). <https://doi.org/10.1080/13669877.2019.1569094>.

Voutilainen, M., Kekäläinen, P., Siitari-Kauppi, M., Sardini, P., Muuri, E., Timonen, J. & Martin, A. 2017. Modeling Transport of Cesium in Grimsel Granodiorite With Micrometer Scale Heterogeneities and Dynamic Update of Kd. *Water Resources Research*, October 2017, 53, 9245–9265.

Wiikinkoski, E.W., Harjula, R.O., Lehto, J.K., Kemell, M.L. & Koivula, R.T. 2017. Effects of synthesis conditions on ion exchange properties of α -zirconium phosphate for Eu and Am, *Radiochimica Acta*, Vol 105, p. 1033, doi:10.1515/ract-2016-2740.

Wiikinkoski, E.W., Xu, J., Zhang, W., Hietala, S. & Koivula, R.T. 2018. Modification of α -Zirconium Phosphate Synthesis – Effects of Crystallinity and Acidity on Eu(III) and Am(III) Ion Exchange, *ChemistrySelect* 2018, 3(33), 9583-9588.

Yagodzinskyy, Y., Malitckii, E., Tuomisto, F. & Hänninen, H. 2018. Hydrogen-induced strain localization in oxygen-free copper in the initial stage of plastic deformation, *Philosophical Magazine*, 98 (2018)9, pp. 727-740.

Konferenssijulkaisut ja työraportit

Aarnio, A.-R., Kojo, M. & Litmanen, T. 2017. Fennovoiman loppusijoituslaitoksen yhteiskunnallinen hyväksyttävyys: miten suomalaiset suhtautuvat vaihtoehtoiisiin paikkoihin? *ATS Ydintekniikka* 46(3), 16–20.

Aarnio, A.-R., Kojo, M. Litmanen, T. 2018. Ydinjätteen loppusijoituksen turvallisuuteen suhtaudutaan nykyään kriittisemmin”. *ATS Ydintekniikka*, 47 (1), 14-21.

Abed, A.A., Laitinen, M., Lämsä, J., Harjupatana, T., Sołowski, W.T. & Kataja, M. 2016. Hydro-mechanical modelling of MX-80 bentonite: one dimensional study. In 3rd European Conference on Unsaturated Soils – E-UNSAT 2016., 18005, E3S Web of Conferences, vol. 9, EDP Sciences, European Conference on Unsaturated Soils, Paris, France, 12/09/2016. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20160918005>.

Abed, A.A. & Sołowski, W.T. 2018. Invited publication of the paper in ICE proceedings from 2017 IACMAG conference in Wuhan, China.

Abed, A.A. & Solowski, W.T. 2018. Material Microstructure Effects in Thermo-Hydro-Mechanical Modelling of Bentonite. In: Hoyos, L.R., McCartney, J.S., Houston & Likos, W.J. (eds.), PANAM UNSATURATED SOILS 2017: FUNDAMENTALS. Geotechnical Special Publication, no. 301, pp. 330-339, Pan-American Conference on Unsaturated Soils, Dallas, United States, 12/11/2017. <https://doi.org/10.1061/9780784481684.034>.

Abed, A., Sołowski, W.T., Romero, E. & Gens, A. 2018. Inclusion of chemical effect in a fully coupled THM finite element code. In: Ng, C., Leung, A., Chiu, A. & Zhou, C. (eds.), Unsaturated Soils. vol. 2, The Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong, pp. 827-832, International Conference on Unsaturated Soils, Hong Kong, 03/08/2018.

Ahonen, L., Kietäväinen, R. & Ruskeeniemä, T. 2015. Estimating the past from deep groundwaters in Finland. In: Pärn, J., Raidla, V., Vaikmäe, R., Raukas, A. & Bauert, H. (eds.): 4th Annual Meeting of G@GPS IGCP 618 Project, Estonia, 5–9 July 2015. Abstracts and Field guide. Tallinn University of Technology, Tallinn, p. 7.

Aromaa, J., Chernyaev, A., Tenitz, A. & Lundström, M. 2018. The effect of reaction product layers on copper corrosion in repository conditions. Eurocorr 2018, 9-13.9.2018, Krakova, Puola.

Auerkari, P., Rantala, J., Tuurna, S. & Pohjanne, P. 2017. Creep ductility: appearance and requirements, 4th Intl. ECCC Creep & Fracture Conference, 10–14 September 2017, Düsseldorf, Germany.

Bomberg, M., Carpén, L. & Rajala, P. 2018. Acetate is an important carbon source for the Fennoscandian deep biosphere, DCO Shanghai.

Carpén, L. 2017. Corrosion phenomena in microbially induced corrosion of copper in repository environment. 2nd Copper Corrosion Seminar, 2 November 2017, Otaniemi, Espoo, Finland: KYT2018-seminaariesitys.

Carpén, L., Rajala, P. & Bomberg, M. 2015. Real-Time Electrochemical Measurements of Carbon Steel in Ground Water with Sulfate Reducing Bacteria Enrichment. Proceedings, vol. 15604. The Annual Waste Management Conference 2015, WM Proceedings, 15–19 March 2015, Phoenix, Arizona, USA.

Carpén, L., Rajala, P. & Bomberg, M. 2015. Microbially Induced Corrosion in Deep Bedrock. Presentation in IBS 2015 (International Biohydrometallurgy Symposium), Sanur, Bali 5.–9.10.2015.

Carpén, L., Rajala, P. & Bomberg, M. 2016. Microbially induced corrosion of copper in simulated anoxic ground-water. The annual event of the European Federation of Corrosion, EUROCORR 2016, 11- 15 September 2016, Montpellier, France: EFC, No. Paper 62882.

Carpén, L., Rajala, P., Bomberg, M. & Huttunen-Saarivirta, E. 2016. Matala- ja keskiaktiivisen jätteen mikrobiologinen korroosio (CORLINE) – Vuosiraportti 2015. Tutkimusraportti: VTT-R-00868-16, VTT.

Carpén, L., Rajala, P., Bomberg, M. & Huttunen-Saarivirta, E. 2017. Matala- ja keskiaktiivisen jätteen mikrobiologinen korroosio (CORLINE) – Vuosiraportti 2016. Tutkimusraportti: VTT-R-01118-17, VTT, 45 s.

Carpén, L., Rajala, P., Bomberg, M. & Huttunen-Saarivirta, E. 2018. Matala- ja keskiaktiivisen jätteen mikrobiologinen korroosio (CORLINE) – Vuosiraportti 2017. Tutkimusraportti: VTT- R-01739-18, VTT.

Carpén, L., Rajala, P., Bomberg, M., Raunio, M. & Huttunen-Saarivirta, E. 2016. Mikrobiologisen toiminnan vaikutus kuparin korroosioon loppusijoituksen hapettomissa olosuhteissa (BASUCA) – Vuosiraportti 2015. Tutkimusraportti: VTT-R-00867-16, VTT, 32 s.

Carpén, L., Rajala, P., Bomberg, M., Raunio, M. & Huttunen-Saarivirta, E. 2017. Mikrobiologisen toiminnan vaikutus kuparin korroosioon loppusijoituksen hapettomissa olosuhteissa (BASUCA) – Vuosiraportti 2016. Tutkimusraportti: VTT-R-00992-17, VTT, 46 s.

Carpén, L., Rajala, P., Huttunen-Saarivirta, E. & Bomberg, M. 2017. Corrosion Behavior of Copper in Simulated Anoxic Groundwater Inoculated with Sulfate Reducing Bacteria and Methanogens, Corrosion 2017, C2017-9355. Esitys ja julkaisu.

Carpén, L., Rajala, P. & Kinnunen, T. 2018. Real-time corrosion monitoring system under in situ conditions of crystalline groundwater. Eurocorr2018-114552, 9–13 September, Krakow, Poland.

Dobson, P., Tsang, C.-F., Doughty, C., Ahonen, L., Kietäväinen, R., Juhlin, C., Rosberg, J.-E., Borglin, S., Kneafsey, T., Rutqvist, J., Zheng, L., Xu, H., Nakagawa, S. & Nihei, K. 2017. Deep Borehole Field Test Research Activities at LBNL 2017, Report prepared for US Department of Energy, Spent Fuel and Waste Science and Technology, 118 s. (raportti).

Dzugala, M., Sirkiä, J., Uotinen, L.K.T. & Rinne, M. 2017. Pull Experiment to Validate Photogrammetrically Predicted Friction Angle of Rock Discontinuities, ISRM European Rock Mechanics Symposium – Ostrava, Czech Republic, 20 Jun – 22 Jun 2017, Symposium of the International Society for Rock Mechanics, Publisher Elsevier, Pages 378-385.

Elo, O., Huittinen, N., Müller, K., Ikeda-Ohno, A., Scheinost, A.C. & Hölttä, P. 2015. A macroscopic and spectroscopic investigation of neptunium(V) adsorption on montmorillonite and corundum. Poster: 3rd BELBaR annual workshop, Madrid, Spain, March 5–6, 2015.

Elo, O., Hölttä, P., Huittinen, N. & Lehto, J. 2015. Neptunium (V) sorption onto montmorillonite and bentonite colloids and the influence of colloids on Np(V) transport. Poster: Migration 2015 conference, Santa Fe, NM, USA September 13–18, 2015.

Elo, O., Huittinen, N. & Hölttä, P. 2016. Neptunium(V) sorption onto montmorillonite and bentonite colloids and the influence of colloids on Np(V) transport. Poster: BELBaR Final Workshop, Berlin, Germany, February 3–4, 2016.

Elo, O., Huittinen, N. & Hölttä, P. 2016. Neptunium(V) uptake by granitic rock and bentonite colloids and the influence of colloids on Np(V) transport. Poster: International Conference on Nuclear and Radiochemistry (NRC9), Helsinki, Finland August 29 – September 2, 2016.

Elo, O., Hölttä, P. & Huittinen, N. 2017. The influence of bentonite colloids on neptunium(V) migration in granitic rock. Poster: Migration 2017 conference, Barcelona, Spain, September 10–15, 2017.

Eschbach, R., Feng, B., Vezzoni, B., Gabrielli, F., Alvarez-Velarde, F., Léger, V., Rocchi, F., Edwards, G., Dixon, B., Pénéliou, Y., Girieud, R., Häkkinen, S., Viitanen, T., Rätty, A., Malambu, E.M. & Cornet, S. 2017. Verification of Dose Rate Calculations for PWR Spent Fuel Assemblies, Proceedings of GLOBAL 2017, September 24–29, 2017 – Seoul (Korea).

Forsström, A., Becker, R., Öjjerholm, J., Yagodzinskyy, Y., Hänninen, H. & Linder, J. 2017. Hydrogen absorption in copper as a result of corrosion reactions in sulphide and chloride containing deoxygenated water at 90 °C in simulated spent nuclear fuel repository conditions, Proceedings of the EUROCORR 2017 & 20th International Corrosion Congress ICC. 13 p.

Harjupatana, T., Alaraudanjoki, J. & Kataja, M. 2015. X-ray tomographic method for measuring 3D deformation and liquid content in swelling materials. Proceedings of the XII Finnish Mechanics Days: Suomen XXII mekaniikkapäivien esitelmät.

Harjupatana, T., Lämsä, J., Alaraudanjoki J. & Kataja, M. 2016. Monitoring free swelling of MX80 bentonite in a narrow channel using X-ray imaging. BelBar Final Workshop, 3.–4.2.2016. Berlin, Germany.

Heikola, T. & Ollila, K. 2017. Carbon-14 Source Term, CAST, Final Report (D2.9).

Heikola, T. & Ollila, K. 2018. Release and speciation of carbon from stainless steel under mildly and highly alkaline, reducing conditions (D2.9). CAST final report.

Heinonen, S., Ahonen, L., Kietäväinen, R. & Kukkonen, I. 2017. The Outokumpu Deep Drill Hole: window to the Precambrian bedrock of Finland. Geophysical Research Abstracts, EGU General Assembly, Vienna, Austria, 23.–28.4. (abstrakti ja poster).

Huttunen-Saarivirta, E. 2016. EIS study on aerobic corrosion of copper in ground water: influence of micro-organisms. EIS2016 conference, A Toxa, Espanja 19.–24.6. 2016.

Huttunen-Saarivirta, E., Rajala, P. & Carpén, L. 2015. Corrosion behaviour of copper under biotic and abiotic conditions in anoxic ground water: electrochemical study EMCR 2015 Tróia, 24-29 May.

Huttunen-Saarivirta, E., Rajala, P. & Carpén, L. 2017. Microbially induced corrosion (MIC) of carbon steel and stainless steels grades EN 1.4301 and EN 1.4432 in deep bedrock environment, Eurocorr2017-86186. September 3–7, Prague, Czech Republic.

Häkkinen, S. 2016. AFCS kokous 6.–7.10.16, Matkaraportti.

Häkkinen, S. 2017. Matkaraportti AFCS:n kokouksesta, 5.–6.10.2017, Pariisi.

Häkkinen, S. 2017. Matkaraportti WPFC:n ja AFCS:n kokouksista, 6.–8.2.2017, Pariisi.

Häkkinen, S. 2018. Matkaraportti WPFC:n ja AFCS:n kokouksista, 7.–9.2.2018 Pariisi.

Häkkinen, S. 2018. Matkaraportti AFCS:n kokouksesta, 27.–28.9.2018, Pariisi.

Häkkinen, S. & Wiikinkoski, E. 2015. Kehittyneiden polttoainekiertojen tutkimus maailmalla, VTT-R-00431-15.

Hänninen, H. & Yagodzinskyy, Y. 2016. Hydrogen absorption and behavior in copper as a result of corrosion reactions and γ -radiation in spent nuclear fuel repository conditions. 6th International Workshop on Long-Term Prediction of Corrosion Damage in Nuclear Waste Systems, May 9–12, 2016, Toronto, Ontario, Canada, pp. 26-27.

Hänninen, H., Forsström, A. & Yagodzinskyy, Y. 2017. Copper behavior in geological nuclear waste disposal. EUROCORR 2017, 20th International Corrosion Congress & Process Safety Congress 2017, September 3-7, 2017, Prague, Czech Republic. 10 p.

Hänninen, H., Yagodzinskyy, Y. & Forsström, A. 2018. Hydrogen effects on mechanical performance of nodular cast iron. Stress-Assisted Corrosion Damage V, July 15-20, 2018, Sloss Hernstein, Austria, ECI Engineering Conferences International.

Hänninen, H., Forsström, A. & Yagodzinskyy, Y. 2018. Copper behavior in geological nuclear waste disposal. EFC "Green book" 50 Years of Nuclear Corrosion – a Review. EFC, 2018, 12 p.

Hänninen, H. 2018. Kärnavfallsrådet, Kunskapsläget på kärnavfallsområdet 2018 – Beslut under osäkerhet, SOU 2018:8, pp. 83-94.

Hölttä, P., Elo, O., Suorsa, V. & Niemiahio, S. 2015. Radionuclide/colloid interaction and transport – Update of laboratory experiments. Poster: 3rd BELBaR annual workshop, Madrid, Spain, March 5–6, 2015.

Hölttä, P., Suorsa, V., Niemiahio, S. & Lehto, J. 2015. Bentonite erosion and stability of formed colloids, 2015. Poster: Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement conference, Brussels, Belgium, March 23–26, 2015.

Hölttä, P., Suorsa, V., Elo, O. & Lehto, J. 2015. Macroscopic interaction of radionuclides with montmorillonite and bentonite colloids. Poster: Migration 2015 conference, Santa Fe, NM, USA September 13–18, 2015.

Hölttä, P., Elo, O., Suorsa, V., Honkaniemi, E. & Niemiahio, S. 2015. Radionuclide/colloid interaction and transport – Summary of laboratory experiments. Oral presentation: BELBaR WP Progress Workshop, Karlsruhe, Germany October 12–13, 2015.

Hölttä, P., Elo, O., Suorsa, V., Honkaniemi, E. & Niemiaho, S. 2016. Effects of bentonite colloids on the radionuclide migration in granitic rock. Poster: BELBaR Final Workshop, Berlin, Germany, February 3–4, 2016.

Hölttä, P., Elo, O., Suorsa, V., Honkaniemi, E. & Niemiaho, S. 2016. Effects of bentonite colloids on the radionuclide migration in granitic rock. Poster: International Conference on Nuclear and Radiochemistry (NRC9), Helsinki, Finland August 29 – September 2, 2016.

Iakovlev, D., Sirkiä, J., Kallio, P. & Uotinen, L. 2016. Determination of joint mechanical parameters for stability analysis in low stress open pit mines. In: Johansson, E. & Raasakka, V. (Eds.), 7th International Symposium on In-Situ Rock Stress: Symposium Proceedings (RIL). Tampere, Finland: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-201701191164>.

Iso-Markku, T. 2018. ⁵⁵Fe, ⁶³Ni and ⁵⁹Ni in old nuclear reactor pressure vessel steel samples. Suullinen esitys seminaarissa NKS-B RADWORKSHOP, 8.–12.10. 2018 Risö, Roskilde, Tanska.

Juutilainen, J. 2018. Non-linear transfer of elements into organisms. Cores Symposium on Radiation in the Environment Scientific Achievements and Challenges for the Society, July 2018, Helsinki, Finland, STUK-A261, p 71-73.

Juutilainen, P. 2016. SITON-polttoainekierto-koodin käyttöönotto, VTT-R-00903-16, 2016.

Juutilainen, P. 2017. COSI6-laskuja SITON-ohjelman validointia varten”, VTT-R-01108-17, 2017.

Juutilainen, P. & Häkkinen, S. 2017. EPR fuel assembly calculations to determine homogenized one-group cross-sections for various MOX compositions, VTT-R-01082-18, 2018.

Kari, M. 2018. Host Municipality Approaches to Final disposal of Spent Nuclear Fuel in Finland and Sweden. Presentation in 22nd REFORM group meeting, Energy Democracy and Climate Change Policy. August 26 – August 31, 2018. Salzburg, Austria.

Kari, M. 2015. Civil Regulation of Final Disposal of Spent Nuclear Fuel. Comparison of Finnish and Swedish Risk Regulation Regimes, Seminar on Governance of Nuclear Safety and Nuclear Risks, University of Jyväskylä, Finland, 8 May 2015.

Kari, M. 2015. Civil Regulation of Final Disposal of Spent Nuclear Fuel. Comparison of Finnish and Swedish Risk Regulation Regimes, ESA2015 Prague, Czech Republic 25–28 August 2015.

Karlsen, W. 2016. The VTT Centre for Nuclear Safety, up-grading Finnish nuclear safety research, ATS Ydintekniikka, vol. 3, 2016, p. 42.

Karlsen, W. 2016. The new VTT Centre for Nuclear Safety, Suomalaisen Ydintekniikan Päivät 2016 – SYP2016. https://ats-fns.fi/images/files/2016/syp2016/presentations/TSG1_WKarlsen_VTTCentreForNuclearSafety.pdf.

Karlsen, W. & Paasila, M. 2016. Description of radioactive specimen storage database system, VTT Report VTT-R-00252-16.

Karlsen, W. & Rahnfeld, C. 2017. Fabrication and Installation of VTT's new hot cells, In: Proceedings of the 54th Annual Meeting of the Hot Laboratories and Remote Handling Working Group, HOTLAB 2017, September 17–22, 2017, Mito, Japan, 14 p. <http://hotlab.sckcen.be/en/Proceedings>.

Karvonen, S. & Peura, J. 2016. Literature review on safety case in nuclear waste deposition. 33 p. (<https://www.vtt.fi/sites/turmet/>).

Kataja, M., Harjupatana, T. & Riikilä, T. 2017. X-ray imaging/tomographic measurements of water transport and swelling deformation in bentonite. Beacon kick-off seminar. Kaunas, Lithuania, 19.–20.6.2017.

Kataja, M., Lämsä, J. & Harjupatana, T. 2015. Measurement of water transport and swelling of bentonite clay using X-ray imaging. An update. BelBar Workshop, 12.–13.10.2015. Karlsruhe, Germany.

Kieft, T.L., Onstott, T.C., Ahonen, L., Aloisi, V., Colwell, F.S., Engelen, B., Fendrihan, S., Gaidos, E., Harms, U., Head, I., Kallmeyer, J., Kiel Reese, B., Lin, L.-H., Long, P.E., Moser, D.P., Mills, H., Sar, P., Schulze-Makuch, D., Stan-Lotter, H., Wagner, D., Wang, P.-L., Westall, F. & Wilkins, M.J. 2015. Workshop to develop deep-life continental scientific drilling projects. *Scientific Drilling* 3, 1-11.

Kietäväinen, R. & Ahonen, L. 2017. Gases in bedrock groundwater: Geochemical potential for sustaining deep life. *Goldschmidt Conference, Paris, France*, 13.–18.8. (abstrakti ja poster).

Kietäväinen, R. & Ahonen, L. 2018. Carbon cycling and nuclear waste disposal: Evidence for methanogenesis at low temperature bedrock setting. *Goldschmidt Conference, Boston, MA, USA*, 12.–17.8.2018.

Kietäväinen, R., Ahonen, L., Hendriksson, N., Kukkonen, I.T., Niedermann, S. & Wiersberg, T. 2016. Deep groundwater evolution in Outokumpu, eastern Finland – from meteoric water to saline gas rich fluid. *Bulletin of the Geological Society of Finland, Special volume: Abstracts of the 32nd Nordic Geological Winter Meeting, 13–15th January 2016, Helsinki, Finland*, p. 93.

Kietäväinen, R., Ahonen, L., Niinikoski, P., Nykänen, H. & Kukkonen, I.T. 2017. At the interface of geology and biology: Occurrence of methane down to 2.5 km depth within the Precambrian Fennoscandian Shield. *Deep Carbon Observatory (DCO) Early Career Scientist Workshop, Sicily, Italy* 28.8.–2.9. (abstrakti ja poster).

Kietäväinen, R., Ahonen, L. & Purkamo, L. 2015. Thermodynamic constraints on methane production and consumption in deep crystalline rock biosphere. *22nd International Symposium on Environmental Biogeochemistry, Piran, Slovenia*, 27.9.–2.10.2015.

Kietäväinen, R., Ahonen, L., Wiersberg, T., Korhonen, K., Pullinen, A. & Kukkonen, I.T. 2017. Deep Breath: Earth Tide Controlled Gas Flux from the Outokumpu Deep Drill Hole. *3rd Finnish National Colloquium of Geosciences, Espoo*, 15–16 March 2017, abstract book s. 50. (abstrakti ja esitelmä).

Kietäväinen, R., Ahonen, L., Wiersberg, T., Korhonen, K. & Pullinen, A. 2017. Tidal control on gas flux from the Precambrian continental bedrock revealed by gas monitoring at the Outokumpu Deep Drill Hole, Finland. Geophysical Research Abstracts Vol. 19, EGU2017-12348, EGU General Assembly, Vienna, Austria, 23.–28.4. (abstrakti ja poster).

Kietäväinen, R., Etiope, G., Ahonen, L. & Kukkonen, I.T. 2015. Crustal methane in Finland – an oddity or commonplace? In: Kultti S., Rämö O.T., Koivisto E. & Luoto M. (eds.), 2nd Finnish National Colloquium of Geosciences, Helsinki, Finland, 3.–5.3.2015, Program and Abstracts, Department of Geosciences and Geography C10, s. 23 (suullinen esitys).

Kietäväinen, R., Etiope, G., Ahonen, L. & Kukkonen, I.T. 2015. Crustal methane in Finland. 2nd DCO Early Career Scientist Workshop, Ponta Delgada, Azorit, 31.8.–5.9.2015 (suullinen esitys + poster)

Kietäväinen, R., Etiope G. & Ahonen, L. 2018. Occurrence and flux of crustal methane in the Fennoscandian Shield. Geophysical Research Abstracts Vol. 20, EGU2018-6115, European Geosciences Union (EGU) General Assembly, Vienna, Austria, 8.–13.4.2018.

Kojo, M. & Litmanen, T. 2018. Hallinnan keinot YVA-menettelyn yleisötilaisuudessa: Puheenjohtajan roolit vuorovaikutuksen edistämisessä. Teoksessa Kestilä-Kekkonen, E. & Raunio, T. (toim.) Valta ja politiikka. Juhlakirja Ilkka Ruostesaarelle hänen 60-vuotispäivänään. Valtiotieteellinen yhdistys ry. 101-130.

Kojo, M. 2018. Is there a Nordic model of final disposal of spent nuclear fuel? Governance insights from Finland and Sweden (invited speaker). NUCLEAR FUTURES: Re-making sociotechnical research agendas. Seminar 6, 10.–11.9.2018, Sheffield, United Kingdom.

Kojo, M. 2017. Participation in the Finnish final disposal facility development process, NUCLEAR FUTURES: Re-making sociotechnical research agendas. Seminar 3, 8–10 January 2017, Norwich, United Kingdom (invited speaker).

Kojo, M. 2016. Finnish and Swedish site selection programmes – different dialogue styles? Ethical Perspectives on the Nuclear Fuel Cycle, Swedish Nuclear Waste Council seminar, June 13, 2016 Stockholm, (invited speaker).

Kojo, M. 2015. Print media attention to licensing procedures for spent nuclear fuel repositories in Finland and Sweden, SENIX conference, Stockholm, Sweden, 25–27 May 2015.

Kojo, M. 2015. Print media attention to licensing procedures for spent nuclear fuel repositories in Finland and Sweden, Seminar on Governance of Nuclear Safety and Nuclear Risks, University of Jyväskylä, Finland, 8 May 2015.

Kojo, M., Kari, M., Litmanen, T. & Oksa, A. 2016. Comparison of print media attention to final disposal of spent nuclear fuel in Finland and Sweden. SENIX Conference, 13–15 June 2016, Stockholm, Sweden.

Kojo, M., Oksa, A., Vilhunen, T., Kari, M. & Litmanen, T. 2016. The Final Decision – Ethical Views on Final Disposal in Finland and Sweden, Nuclear Science and Technology Symposium, 2.11.2016, Helsinki.

Kojo, M., Kari, M. & Litmanen, T. 2016. Print media attention to licensing processes for spent nuclear fuel repositories in Finland and Sweden, Nordic-Asia energy and climate policy research seminar, 18 November 2016, Jyväskylä.

Kojo, M., Kari, M., Litmanen, T. & Vilhunen, T. (Esittäjänä Litmanen, T.) 2017. High profile risk cases in the media. Print media attention to licensing procedures for spent nuclear fuel repositories in Finland and Sweden. Paper presented at the hopefulNESS 2017, The 13th Nordic Environmental Social Science Conference, 6–8th June 2017, University of Tampere, Finland.

Kojo, M., Kari, M., Oksa, A., Vilhunen, T. & Litmanen, T. 2017. Käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoitusta koskeva mediahuomio Suomessa ja Ruotsissa 2008–2015”. Poster. KYT midterm seminar, Helsinki, 7 April 2017.

Kojo, M., Litmanen, T., Kari, M., Oksa, A. & Vilhunen, T. 2017. Governing Safety in Finnish and Swedish Nuclear Waste Regimes (SAFER). KYT midterm seminar, Helsinki, 7 April 2017.

- Kojo, M., Oksa, A., Vilhunen, T. & Litmanen, T. (Esittäjänä Kojo, M.) 2017. Ethical discussion on final disposal of Spent nuclear fuel in Finland and Sweden. Final ENTRIA Conference Research on Radioactive Waste Management. Ethics – Society – Technology, Braunschweig, Germany, 27 September 2017.
- Kojo, M., Vilhunen, T. & Litmanen, T. (Esittäjinä Kojo, M. & Vilhunen, T.) 2017. Ethical aspects of final disposal of spent nuclear fuel at the host community level: The resident survey in Pyhäjoki and Eurajoki in Finland. 13th Conference of the European Sociological Association, Athens, Greece, 31 August 2017.
- Kojo, M., Lehtonen, M., Jartti, T., Litmanen, T. & Kari, M. 2018. Social License to Operate in Nuclear Waste Management. The annual meeting of the Society for Social Studies of Science (4S) Open panel 142. Environmental Risks in Transnational Contexts II, 29.8.–1.9.2018 Sydney.
- Kuusela-Lahtinen, A., Sinnathamby, G., Mendez, J., Sołowski, W.T., Gallipoli, D., Pintado, X. & Korkiala-Tanttu, L.K. 2016. Estimation of water retention behaviour of MX-80 bentonite partially saturated with saline solution. in 3rd European Conference on Unsaturated Soils – E-UNSAT 2016., 11006, E3S Web of Conferences, vol. 9, EDP Sciences, European Conference on Unsaturated Soils, Paris, France, 12/09/2016. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20160911006>.
- Kuva, J., Voutilainen, M., Lindberg, A., Parkkonen, J., Siitari-Kauppi, M. & Timonen, J. 2015. Pore and mineral structure of rock using nano-tomographic imaging MRS Proceedings 1744: 235-240 (2015).
- Kuva, J., Voutilainen, M., Parkkonen, J., Turpeinen, T., Siitari-Kauppi, M., & Timonen, J. 2015. Tomographic investigation of cesium migration in Olkiluoto veined gneiss and Grimsel granodiorite, suullinen esitys Fysiikan päivillä.
- Kuva, J., Parkkonen, J., Turpeinen, T., Timonen, J., Voutilainen, M., Siitari-Kauppi, M., Sammaljärvi, J. & Lehtonen, M. 2015. Tomographic investigation of caesium migration in Olkiluoto veined gneiss and Grimsel granodiorite, posteresitys Migration2015–konferenssissa.
- Laine, E. 2017. Rakoverkkomallinnus, menetelmät ja ohjelmistot. GTK:n työraportti 17/2017 (31.3.2017).

Laine, E. 2019. Julia scripts for fracture analysis. GTK:n työraportti 2019.

Laine, E. & Markovaara-Koivisto, M. 2015. 3D visualization and analysis of fracturing in the Precambrian bedrock characterized by complicated structures, two case studies from southern Finland. (laajennettu abstrakti 10 s.) IAMG2015, Freiberg, 5th–13th September 2015.

Laine, E. & Markovaara-Koivisto, M. 2015. Rakoverkkomallinnus. KYT2018-seminaari, Kallioperän rikkonaisuuden mallinnus Suomessa. Esitelmä. http://kyt2018.vtt.fi/seminaari_03122015/Laine.pdf.

Laine, E. & Markovaara-Koivisto, M. 2016. New 3D modeling approaches in the study of Palmottu fracture patterns. Bulletin of The Geological Society of Finland, Special Volume. Abstracts of the 32nd Nordic Geological Winter Meeting 13th–15th January 2016, Helsinki, Finland. pp. 94.

Laine, E. & Markovaara-Koivisto, M. 2016. The 3D visualization and analysis of Laser scanning data together with geological and geophysical data applied for fracture network modeling – examples studies from southern and eastern Finland. The 2nd Virtual Geoscience Conference (VGC 2016), Bergen, Norja 20.–23.9.2016.

Laine, E. & Markovaara-Koivisto, M. 2016. Rakoverkkomallinnuksen (DFN) lähtötiedot. Louhintaja kalliomekaniikan päivät 13.–14.10., Hotelli Haaga, Helsinki, posteresitys.

Laine, E. & Markovaara-Koivisto, M. 2018. A workflow for fracture network modelling – Palmottu and Kopparnäs study sites from southern Finland. Abstrakti. GeoEnv-kokous Belfastissa 4.–5.6.

Lavonen, T. & Ollila, K. 2015. C-12 release during corrosion of unirradiated steels in simulated groundwaters (in: CAST – First Annual Report). VTT Research Report, VTT-R-00596-15. 2015.

Lehmus, E. & Leivo, M. 2016. Applicability of Geopolymers to Nuclear Waste Management, Esitys NUCCON 2016 – Betoni ydinvoimarakenteissa -seminaarin yhteydessä. Nordic Concrete Research Seminar 31.10.–1.11.2016 Espoo.

Lehtonen, M. 2018. Trust in radioactive waste management policies: a historical analysis of four forerunner countries, Presentation at the European Consortium for Political Research (ECPR) General Conference, panel People, States, Power: Analyzing Energy Justice Regimes?, 25 August, 2018, Hamburg.

Lehtonen, M. 2018. Should nuclear waste policy adopt the concept of Social License to Operate? Presentation at the 22nd REFORM group meeting, Energy Democracy and Climate Change Policy, 26–31 August, 2018, Salzburg.

Lehtonen, M., Kojo, M. & Litmanen, T. 2017. The Finnish success story in the governance of a megaproject: the (minimal) role of socioeconomic evaluation in the final disposal of spent nuclear fuel. In: Lehtonen, M., Joly, P.-B. & Aparicio, L. (Eds.) *Socioeconomic Evaluation of Megaprojects. Dealing with uncertainties*. Routledge. pp. 83–110.

Lempinen, J., Apter, D. & Lehto, J. 2015. Retention of Radiocarbon by Isotope Exchange between Groundwater and Calcite, posterisitys, Migration 2015, Santa Fe, NM, Yhdysvallat, 13.–18.9.2015.

Lempinen, J. & Lehto, J. 2016. Sorption of dissolved inorganic radiocarbon on goethite, hematite and magnetite, Ninth International Conference on Nuclear and Radiochemistry (NRC9) 2016, Helsinki.

Leskinen, A. 2018. RPV steel activity measurement in KYT2018/VAMMA project, laboratory report, 2018.

Leskinen, A. 2018. Characterisation of Fir1 Triga Mark II Research Reactor – A Combination of Modelling and Experimental. Suullinen esitys konferenssissa 13th International Symposium on Nuclear and Environmental Radiochemical Analysis (ERA13), 17.–20.9. 2018 Cambridge, Iso-Britannia.

Leskinen, A. 2018. Decommissioning of Fir 1 research reactor: status, challenges and solutions. Suullinen esitys seminaarissa NKS-B RADWORKSHOP, 8.–12.10. 2018 Risö, Roskilde, Tanska.

Litmanen, T. 2017. Ethical aspects of final disposal of spent nuclear fuel at the host community level: The resident survey in Pyhäjoki and Eurajoki in Finland. The Cambridge Risk and Uncertainty (RUC) Conference, Session 2: Risk Communication and Ethics, June 12–14th, 2017, Cambridge, UK.

Litmanen, T. 2015. Socio-technical risk governance through dyadic risk dialogue: Copper corrosion as a safety challenge in the geological disposal of spent nuclear fuel, Seminar on Governance of Nuclear Safety and Nuclear Risks, University of Jyväskylä, Finland, 8 May 2015.

Litmanen, T., Vilhunen, T., Kojo, M. & Taebi, B. (esittäjänä Litmanen, T.) 2018. Perceptions of Justice influencing Community Acceptance of Spent Nuclear Fuel Disposal. A Case Study in Two Finnish Nuclear Communities, International Conference and Workshop Regional Risks and Risks to the Regions, Vilnius, Lithuania, 30–31 January 2018.

Litmanen, T., Vilhunen, T., Kojo, M. & Taebi, B. (esittäjänä Litmanen, T.) 2018. Perceptions of justice influencing community acceptance of spent nuclear fuel disposal. A case study in two Finnish nuclear communities, SRA E 2018, Risk and Inequality, part II, The 27th Annual Conference of the Society for Risk Analysis Europe in Östersund, Sweden, June 18–20 2018.

Litmanen, T. 2018. Understanding the Finnish model of final disposal of spent nuclear fuel: The multi-level analysis on Finnish nuclear waste policy. Lecture at NUMO (Nuclear Waste Management Organization of Japan), 14th March 2018. Organized by NUMO & Shizuoka University.

Litmanen, T. 2018. Understanding the Finnish model of final disposal of spent nuclear fuel: The multi-level analysis on Finnish nuclear waste policy. Lecture at the International Symposium: High level radioactive waste disposal and social consensus: Comparing the cases of Finland and Japan, 15th March 2018. Organized by Shizuoka University, the Faculty of Informatics, Department of Socio-Information Studies, Associate professor Takashi Nakazawa.

Litmanen, T. 2018. Nuclear power and nuclear waste policy in Finland: Policy arrangement approach. Lecture at the Forum Political Culture and Nuclear Waste in Finland, Germany and Japan. Organized by Society for Contemporary German History, University of Osaka. Venue: Campus Plaza Kyoto 1st Conference Room, Kyoto, March 18, 2018.

Litmanen, T. 2018. Understanding the Finnish model of final disposal of spent nuclear fuel: The multi-level analysis on Finnish nuclear waste policy. Lecture at the Osaka School of International Public Policy, 20th March 2018. Organized by Osaka University, the Osaka School of International Public Policy, Senior Researcher Nagako Sato.

Lydman, J. 2016. A three month visit at PSI, VTT Report VTT-R-03046-16.

Majlesi, S., Juutilainen, J., Kasurinen, A., Martikainen, P., Mpamah, P., Trubnikova, T. & Biasi, C. 2018. Fate of radionuclide ¹⁴C in soil-plant-atmosphere continuum: on the potential uptake of soil ¹⁴C into plants. Cores Symposium on Radiation in the Environment Scientific Achievements and Challenges for the Society, July 2018, Helsinki, Finland. STUK-A261, P 131-132.

Majlesi, S., Juutilainen, J., Kasurinen, A., Martikainen, P., Mpamah, P., Trubnikova, T. & Biasi, C. 2018. Fate of radionuclide ¹⁴C in soil-plant-atmosphere continuum: on the potential uptake of soil ¹⁴C into plants. 5th European IRPA (International Radiation Protection Association) congress, July 2018, The Hague, The Netherlands. IRPA 2018 Book of Abstracts, P 265.

Marjamaa, K., Vikman, M., Storgårds, E., Salavirta, H. & Itävaara, M. 2015. Genome and in-lab analysis of cold-tolerant *Paenibacillus* spp isolated from low level radioactive waste repository, 11th Carbohydrate Bioengineering Meeting, poster-esitys.

Markovaara-Koivisto, M., Uotinen, L. & Rasilainen, K. 2017. Kalliomassan ja rakojen numeerinen mallinnus (KYT2018 Rakoiluseminaarin 5.12.2017 yhteenveto), Materia 1, 2018, s. 47-49.

Markovaara-Koivisto, M., Laine, E. & Rasilainen, K. 2016. Kallioperän rikkonaisuuden mallinnus Suomessa. *ATS Ydintekniikka*, Vol. 45. No 1, ss. 12-14.

Matusiewicz, M., Järvinen, J., Olin, M., & Muurinen, A. 2017. Microstructural features of compacted MX-80 bentonite after the long-time experiment. *MRS Advances*, 1(61), 4069-4074. <https://doi.org/10.1557/adv.2017.191>.

Mibus, J., Swanton, S., Suzuki-Muresan, T., Rodríguez Alcalá, M., Leganés Nieto, J.L., Bottomley, D., Herm, M., De Visser-Tynova, E., Cvetković, B.Z., Sakuragi, T., Jobbágy, V. & Lavonen, T. 2015. Carbon-14 Source Term (CAST) WP2 Annual Progress Report – Year 1 (D2.2). p. 87.

Mibus, J., Swanton, S., Suzuki-Muresan, T., Rodríguez Alcalá, M., Leganés Nieto, J.L., Bottomley, D., Herm, M., De Visser-Tynova, E., Cvetković, B.Z., Sakuragi, T., Jobbágy, V. Heikola, T. 2015. Carbon-14 Source Term (CAST) WP2 Annual Progress Report – Year 2 (D2.5). p. 98.

Mibus, J., Swanton, S., Suzuki-Muresan, T., Rodríguez Alcalá, M., Leganés Nieto, J.L., Bottomley, D., Herm, M., De Visser-Tynova, E., Cvetković, B.Z., Sakuragi, T., Druyts, F. & Heikola, T. 2017. Carbon-14 Source Term (CAST) WP2 Annual Progress Report – Year 3, October 2015- September 2016 (D2.6). p. 91.

Miettinen, H. 2015. The sulfur cycling and sulfide formation in deep groundwater bedrock. EMBO Workshop on Microbial Sulfur Metabolism, Poster presentation, 12–15.4.2015. Helsingör, Denmark.

Miettinen, H. 2016. 35S-tracer method for analyzing microbial sulfur compound cycling in oligotrophic anoxic groundwater habitat. *VTT Technology* 249. www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2016/T249.pdf.

Miettinen, H. & Itävaara, M. 2016. Geobiokierto tutkimusraportti 2015. VTT-R-00387-16.

Miettinen, H. & Itävaara, M. 2017. Geobiokierto tutkimusraportti 2016, VTT-R-00727-17.

Miettinen, H. 2018. Geobiokierto tutkimusraportti 2017, VTT-R-00688-18.

Miettinen, H., Bomberg, M., Merroun, M., Povedano-Priego, C., Jroundi, F. & Vikman, M. 2018. Comparison of three DNA extraction methods for MX-80 bentonite. MIND Project Annual Meeting 3. Lausanne, 7.–9.5. 2018. Switzerland.

Miettinen, H., Vikman, M. & Itävaara, M. 2017. Activation of deep subsurface ground water microorganism by electron acceptors and donors. MIND Project Annual Meeting 2017. 3.–5.5. 2018. Praha, Tsekki.

Miettinen, H., Vikman, M., Matusiewicz, M. & Itävaara, M. 2017. Long-term lab-scale microbial bentonite storage experiment. MIND Project Annual Meeting 2017. 3.–5.5. 2018. Praha, Tsekki.

Miettinen, H., Vikman, M., Matusiewicz, M., Merroun, M. & Itävaara, M. 2018. Bentonite characteristics after one year of storage with indigenous bentonite and water microbes. MIND Project Annual Meeting 3. Lausanne, 7.–9.5.2018. Switzerland.

Moilanen, P., Lappalainen, P., Planman, T. & Lyytikäinen, T. 2016. Remote opening of an irradiated surveillance capsule by robot, VTT-R-03965-16, 20 p.

Muuri, E. 2015. Cesium sorption on main minerals of crystalline rock; Olkiluoto case study, Migration 2015, 09/2015, Santa Fe, United States, Posterisity.

Muuri, E. 2016. The sorption and diffusion of ¹³³Ba in granitic rocks, The 9th International conference on Nuclear and Radiochemistry, 08/2016, Helsinki, Finland, Posterisity.

Muuri, E. 2016. Upscaling laboratory data towards in situ conditions, Nuclear Science and Technology Symposium, 11/2016, Helsinki, Finland, Suullinen esitys.

Muuri, E. 2017. The in-diffusion of ¹³³Ba in granitic rocks, Migration 2017, 09/2017, Barcelona, Spain, Suullinen esitys.

Muuri, E. 2018. Determination of mineral-specific distribution coefficients of ¹³³Ba from thin sections of granitic rock using filmless electronic autoradiography, The 18th Radiochemical Conference – RadChem 2018, 05/2018, Mariánské Lázně, Czech Republic. Suullinen esitys.

Muuri, E. 2018. Method development for electronic autoradiography with geological samples; Applications in nuclear waste management, 13th International Symposium on Nuclear and Environmental Radiochemical Analysis: ERA13, 09/2018, Cambridge, United Kingdom, Suullinen ja posteresitys.

Myllykylä, E., Heikola, T. & Lavonen, T. 2017. Vertailumittaukseen valmistavat alkuaineanalyysit – RADLAB, VTT Report VTT-R-00697-18, 2018, 35 s.

Ollila, K. & Heikola, T. 2018. Predicting release of carbon-14 nuclide from metallic radioactive waste. In: Holt, E., Kinnunen, P. & Sevelev, D. (Eds.). Impacts from VTT Nuclear Safety and Radioactive Waste Management Research. VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo, Finland, ISBN 978-951-38-8705-6, pp. 80-81.

Pohjola, J., Turunen, J., Lipping, T. & Ikonen, A.T.K. 2016. The influence of foodstuff grouping on doses in safety assessments. Abstracts Book, Ninth International Conference on Nuclear and Radiochemistry – NRC9, Helsinki, 29 August – 2 September 2016 (pp. 499-500).

Pohjola, J., Turunen, J. & Lipping, T. 2017. The Effect of Lake Bottom Sediment Layers on Radionuclide Transport from Bedrock to Biosphere and Doses to Humans. 4th International Conference on Radioecology & Environmental Radioactivity (ICRER), Berlin, 3rd – 8th September 2017.

Pohjola, J., Turunen, J., Lipping, T. & Ikonen, A. 2016. Probabilistic Framework for Modelling the Evolution of Geomorphic Features in 10,000-Year Time Scale: The Eurajoki River Case. Geospatial Data in a Changing World, In: Sarjakoski, T., Yasmina Santos, M. & Sarjakoski, L.T. (eds.) Selected papers of the 19th AGILE Conference, Springer, Switzerland. pp. 369-382.

Purkamo, L. & Kietäväinen, R. 2015. The biological origin, source and cycling of methane in deep crystalline biosphere of Outokumpu, Finland. Geophysical Research Abstracts, Vol. 17, EGU2015-389, EGU General Assembly 2015, Vienna, Austria 12.–14.2015.

Purkamo, L., Bomberg, M., Kietäväinen, R., Salavirta, H., Nyyssönen, M., Nuppunen-Puputti, M., Ahonen, L., Kukkonen, I. & Itävaara, M. 2015. Microbial community structure, activity and functionality from six different depths of deep crystalline bedrock fracture zones from Fennoscandian shield. ASB6 – The Origin, Distribution & Detection of Life in the Universe, London, UK 2.–4.9.2015 Programme and abstracts, p. 36.

Purkamo, L., Bomberg, M., Kietäväinen, R., Salavirta, H., Nyyssönen, M., Nuppunen-Puputti, M., Ahonen, L., Kukkonen, I. & Itävaara M. 2016. Ancient ecosystems in crystalline bedrock fractures. Bulletin of the Geological Society of Finland, Special volume: Abstracts of the 32nd Nordic Geological Winter Meeting, 13- 15th January 2016, Helsinki, Finland, p. 200.

Rajala, P. 2017. The microbial processes affecting the integrity of copper canister in repository. 2nd Copper Corrosion Seminar, 2 November 2017, Otaniemi, Espoo, Finland: KYT2018-seminaariesitys.

Rajala, P., Bomberg, M., Huttunen-Saarivirta, E. & Carpén, L. 2017. Corrosion of stainless steels AISI 304 and AISI 316 induced by sulfate reducing bacteria in anoxic groundwater. Corrosion2017, C2017-9359. Esitys ja julkaisu.

Rajala, P. & Carpén, L. 2017. Loppusijoituksen aerobisen vaiheen korroosio. Poster. KYT2018 puoliväliseminaari, 7.4. Finlandiatalo.

Rajala, P., Carpén, L., Huttunen-Saarivirta, E., Tsitko, I. & Bomberg, M. 2015. Loppusijoituksen aerobisen vaiheen mikrobiologinen korroosio (MICOR) – Vuosiraportti 2015. VTT-R-00882-16.

Rajala, P., Carpén, L., Huttunen-Saarivirta, E., Tsitko, I. & Bomberg, M. 2016. Loppusijoituksen aerobisen vaiheen mikrobiologinen korroosio (MICOR) – Vuosiraportti 2016. VTT-R-01612-17.

Rajala, P., Carpén, L., Huttunen-Saarivirta, E., & Bomberg, M. 2017. Loppusijoituksen aerobisen vaiheen mikrobiologinen korroosio (MICOR) – Vuosiraportti 2017. VTT-R-02763-18.

Rajala, P., Isotahdon, E., Bomberg, M. & Carpén, L. 2019. The microbial processes affecting the integrity of copper canister in geological repository of nuclear waste. Paper accepted to be presented in NACE CORROSION 2019.

Rantala, J., Auerkari, P., Laukkanen, A., Andersson, T. & Pohja, R. 2015. Experimentally verified model based predictions for integrity of copper overpack – Annual report 2015, VTT-R-00832-16.

Rantala, J., Auerkari, P., Laukkanen, A. & Andersson, T. 2016. Experimentally verified model based predictions for integrity of copper overpack – Annual report 2016, VTT-R-01253-17.

Rantala, J., Pohja, R. & Auerkari, P. 2017. Experimentally verified model based predictions for integrity of copper overpack – Annual report 2017, VTT-R-01499-18.

Rantala, J., Hänninen, H., Aromaa, J., Carpén, L., & Rajala, P. 2015. Ydinjätteen kuparivaippa: kestääkö, syökö korroosio, murtaako vety? ATS Ydintekniikka 4/2015. s. 25-27.

Rantala, J., Pohja, R., Auerkari, P., Laukkanen, A. & Andersson, T. 2016. Relaxation behaviour of copper in disposal canisters, BALTICA X, Intl Conf on Life Management and Maintenance for Power Plants, 7-9 June 2016, Helsinki.

Rasilainen, K. (ed.) 2015. KYT2014 Kansallinen ydinjätehuollon tutkimusohjelma, Loppuraportti, Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja, Energia ja ilmasto 59/2015. http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/74970/TEMjul_59_2015_web_19112015.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Rasilainen, K. & Itälä, A. 2016. KYT2018-tutkimusohjelma – kyllä ydinjäte tunnetaan, ATS Ydintekniikka, 3/2016, Vol. 45. ss. 51-54.

Rasilainen, K. 2018. VTT's contribution to the Finnish Nuclear Waste Management Research Programme (KYT2018). In: Holt, E., Kinnunen, P. & Sevelev, D. (Eds.). Impacts from VTT Nuclear Safety and Radioactive Waste Management Research. VTT Technical Research Centre of Finland, pp. 114-115.

Raunio, M., Rajala, P. & Carpen, L. 2015. Corrosion of stainless steel in low oxygen groundwater environment. 16th Nordic Corrosion Congress. 20-22nd May 2015, Stavanger, Norway.

Räty, A. 2016. WPFC/AFCS Expert Group Benchmark on Dose Rate Calculations with Serpent, VTT Research Report VTT-R-01661-16.

Räty, A. & Häkkinen, S. 2018. WPFC/AFCS Expert Group Benchmark on Dose Rate Calculations with Serpent, VTT Research Report VTT-R-02506-18.

Salminen-Paatero, S. 2018. A pilot study for determining ^{55}Fe , ^{63}Ni and ^{59}Ni from nuclear reactor pressure vessel steel in Finland. Posterisitys konferenssissa 13th International Symposium on Nuclear and Environmental Radiochemical Analysis (ERA13), 17.–20.9. 2018 Cambridge, Iso-Britannia.

Siivinen, J. 2017. VTT:n Ydinturvallisuustalon jätteiden käsittely, VTT Report VTT-R-06888-17, 2018, 23 p.

Sirkiä, J., Kallio, P., Iakovlev, D., & Uotinen, L. 2016. Photogrammetric calculation of JRC for rock slope support design. In: Nordlund, E., Jones, T.H. & Eitzenberger, A. (Eds.), Proceedings of the Eighth International Symposium on Ground Support in Mining and Underground Construction: Ground Support 2016 Luleå. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-201701191147>.

Sirkiä, J., Uotinen, L. & Rinne, M. 2015. Kallion rakopintojen mekaaniset ominaisuudet. KYT2018-seminaari, Kallioperän rikkonaisuuden mallinnus Suomessa. Esitelmä. http://kyt2018.vtt.fi/seminaari_03122015/Sirkia.pdf.

Sun, L., Hirvi, J.T., Ling, C.Y., Akinwunmi, B., Kasa, S. & Pakkanen, T.A. 2017. Influence of structural and environmental factors on the swelling pressure of bentonite, 7th international Conference on Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement, Davos, September 2017, poster presentation.

Sun, L., Ling, C., Lavikainen, L., Hirvi, J., Kasa, S. & Pakkanen, T.A. 2016. Prediction of Swelling Pressure in Smectites: A Molecular Dynamics Study, 53rd Annual Meeting of the Clay Minerals Society, Atlanta, June 7, 2016, oral presentation.

Suorsa, V., Hölttä, P., Elo, O. & Lehto, J. 2015. Generation and stability of bentonite colloids. Poster: Migration 2015 conference, Santa Fe, NM, USA September 13–18, 2015.

Suorsa, V. & Hölttä, P. 2016. Generation and stability of bentonite colloids. Poster: BELBaR Final Workshop, Berlin, Germany, February 3–4, 2016.

Suorsa, V. & Hölttä, P. 2016. Block-scale experiment on bentonite colloid – radio-nuclide interaction. Poster: International Conference on Nuclear and Radiochemistry (NRC9), Helsinki, Finland August 29 – September 2, 2016.

Suorsa, V., Hölttä, P., Huber, F. & Schäfer, T. 2017. Block-scale study on radionuclide, montmorillonite colloid and granite interaction. Poster: Migration 2017 conference, Barcelona, Spain, September 10–15, 2017.

Syrjämäki, E., Kojo, M. & Litmanen, T. 2015. Muuttunut hanke: Fennovoiman ydinvoimalahankkeen YVA-yleisötilaisuudet Pyhäjoella vuosina 2013–2014. YFI julkaisuja 2. Jyväskylän yliopisto, Jyväskylä. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-39-6246-3>.

Tosoni, E. & Salo, A. 2016. Literature Review on Scenario Analysis for Nuclear Waste Repositories. 64 p. (<https://www.vtt.fi/sites/turmet/>).

Tosoni, E., Salo, A. & Zio, E. 2016. A prospective review of scenario analysis of nuclear waste repositories, Society for Risk Analysis Europe Conference, June 20–22, 2016, Bath, UK.

Tosoni, E., Salo, A. & Zio, E. 2017. Bayesian networks for comprehensive scenario analysis of nuclear waste repositories. Oral presentation at the Society for Risk Analysis – Europe Conference, held in June 19–21 in Lisbon, Portugal.

Tosoni, E., Salo, A. & Zio, E. 2017. Bayesian networks for scenario analysis of nuclear waste repositories. Oral presentation at the Society for Risk Analysis – Nordic Chapter Conference, held in November 2–3 in Espoo, Finland.

Tsang, C.-F., Rosberg, J.-E., Ahonen, L. & Juhlin, C. 2016. Hydrogeological testing and sampling at the COSC-1 borehole. Bulletin of the Geological Society of Finland, Special volume: Abstracts of the 32nd Nordic Geological Winter Meeting, 13–15th January 2016, Helsinki, Finland, p. 148.

Turunen, J., Pohjola, J. & Lipping, T. 2018. Sensitivity analysis of radionuclide transport in biosphere analysis. STUK-A261 In: Salomaa, S., Lusa, M. & Vaaramaa, K. (eds.). Cores Symposium on Radiation in the Environment – Scientific Achievements and Challenges for the Society, 16.–17.4.2018, Helsinki, Finland.

Tähtinen, S. 2016. VTT Hot Cell Design and Manufacturing by ITD – Project Quality Plan – Manufacturing, VTT Report, VTT-R-04150-16, 29 p.

Tähtinen, S. 2017. Background study on machining options in the VTT hot cells, VTT Report VTT-R-03878-17, 2017, 26 p.

Tähtinen, S. 2017. VTT Ydinturvallisuustalon kuumakammioiden toimintaperiaate, VTT Report VTT-R-00485-18, 2018, 18 p.

Uotinen, L.K.T., Korpi, E., Hartikainen, A., Yorke, R., Antikainen, J., Johansson, F., & Rinne, M. 2015. A Method to Downscale Joint Surface Roughness and to Create Replica Series using 3D Printed Molds. In 13th ISRM International Congress of Rock Mechanics, Montréal, Quebec, Canada, 10–13 May 2015. International Society for Rock Mechanics. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4123.7848>.

Vehmas, T. 2015. Introduction to Geopolymers. Research Report VTT-R-04953-15, 21 p.

Viitanen, T. 2016. WPFC ja AFCS kokoukset 1.–3.2.16, Matkaraportti.

Vikman, M., Itävaara, M. & Carpen, L. 2016. Matala- ja keskiaktiivisen ydinjätteen loppusijoituksen mikrobiologisen riskit Suomessa, VTT Technology 273. VTT, 41 s. ISBN 978-951-38-8457-4. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2016/T273.pdf>.

Vikman, M., Marjamaa, K., Miettinen, H. & Itävaara, M. 2016. Matala- ja keskiaktiivisen jätteen loppusijoituksen mikrobiologia, Tutkimusraportti 2015. VTT-R-00694-16.

Vikman, M. & Itävaara, M. 2017. Matala- ja keskiaktiivisen jätteen loppusijoituksen mikrobiologia, Tutkimusraportti 2016, VTT-R-00786-17.

Vikman, M. 2018. Matala- ja keskiaktiivisen jätteen loppusijoituksen mikrobiologia, Tutkimusraportti 2017, VTT-R-00601-18.

Vikman, M., Marjamaa, K. & Itävaara, M. 2016. Microbiological degradation of LLW under repository conditions – Case TVO, MIND Project Annual Meeting 1, Extended Abstracts, Granada May 2–4, 2016. <http://www.mind15.eu>.

Vikman, M., Marjamaa, K., Itävaara, M., Nykyri, M., Small, J. & Paaso, N. 2017. Microbial degradation of low-level radioactive waste in repository conditions, Esitelmä, Goldschmidt 2017, 13–18 August 2017, Paris, France 2017. European Association of Geochemistry.

Vikman, M., Matuszewicz, M., Sohlberg, E., Miettinen, H., Järvinen, J., Itälä, A., Rajala, P., Raulio, M., Muurinen, A., Tiljander, M. & Olin, M. 2018. Long-term experiment with compacted bentonite. VTT Technology, 332. <https://cris.vtt.fi/ws/portalfiles/portal/19390120/T332.pdf>.

Vikman, M., Miettinen, H., Itävaara, M. & Weckman, K. 2017. Microbiological degradation of LLW under in situ conditions, MIND Project Annual Meeting 2017. 3.–5.5. 2018. Prague, Czech Republic.

Vikman, M., Miettinen, H. & Itävaara, M. 2018. Large-scale gas generation experiment with low-level radioactive waste. MIND Project Annual Meeting 3. Lausanne, 7.–9.5.2018. Switzerland.

Vilhunen, T., Kojo, M. & Litmanen, T. (Esittäjinä Kojo, M. & Vilhunen, T.) 2017. Ethical perceptions and community acceptance of the repository for spent nuclear fuel: Comparing residents' opinions in two Finnish nuclear communities. Tampereen yliopisto, johtamiskorkeakoulu, valtio-opin tutkimusseminaari, 16.10.2017, Tampere.

Wiikinkoski, E.W., Koivula, R.T. & Harjula, R.O. 2016. Effects of synthesis conditions on trace level ion exchange properties of α -zirconium phosphate variants for $^{152}\text{Eu}^{3+}$ and $^{241}\text{Am}^{3+}$. Poster abstract in abstract book. The Ninth Nuclear and Radiochemistry Conference (NRC9), Helsinki, 29.8.–2.9.2016.

Yagodzinsky, Y., Malitckii, E. & Hänninen, H. 2015. Hydrogen-induced strain localization in oxygen-free copper at the initial stage of plastic deformation. EUROMAT 2015, Warsaw, September 19–24, 2015.

Yagodzinsky, Y., Malitckii, E. & Hänninen, H. 2016. Hydrogen effects on strain localization in FCC metals at the initial stage of plastic deformation. 2016 International Hydrogen Conference, September 11–14, 2016, Moran, Wyoming, USA, 8 p.

Yagodzinsky, Y., Forsström, A. & Hänninen, H. 2018. Hydrogen uptake and its effects on mechanical performance of nodular cast iron. EUROCORR 2018, Krakow, Poland, 9–13 September, 2018.

Yang, X., Sołowski, W.T., Fan, H. & Dang, J. 2018. Experimental Study on Effects of NaCl Solutions on Soil-Water Characteristic Curves of Expansive Soil. In: Proceedings of China-Europe Conference on Geotechnical Engineering: Volume 2. vol. 2, Springer Series in Geomechanics and Geoengineering, pp. 1328-1331, China-Europe Conference on Geotechnical Engineering, Vienna, Austria, 13/08/2018. https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-319-97115-5_94.

Opinnäytteet

Kandidaatintutkielmat

Heczko, V. 2018. Bariumin jakautuminen kiven päämineraaleihin. Kandidaatintutkielma Helsingin yliopisto (21.8.2018).

Honkaniemi, E. 2015. Radionuklidien pidätyminen bentoniittisaveen. Luonnontieteiden kandidaatintutkielma Helsingin yliopisto.

Kallio, P. 2015. Rakopinnan karkeuden mittaaminen fotogrammetrisesti. Kandidaatintyö. Aalto-yliopisto. 31 s. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-201506033095>.

Kivivirta, S. 2017. Kiven leikkauskokeen numeerinen mallintaminen ydinjätteen loppusijoitusta varten (kandityö), Aalto-yliopisto.

Matara-aho, M. 2015. ^{134}Cs in konsentraatioisotermien määrittäminen kiteisen kiven päämineraaleille. Kandidaatintutkielma Helsingin yliopisto (28.5.2015).

Pakkanen, N. 2019. ^{134}Cs sorptio bentoniittiin ja kolloideihin. Luonnontieteiden kandidaatintutkielma Helsingin yliopisto.

Tolvanen, L. 2015. Itsetiivistyvä betoninen jäljennysmateriaali rakopinnoille. Kandidaatintyö. Aalto-yliopisto. 15 s. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-201506033137>.

Suorsa, V. 2015. ^{137}Cs :n konsentroidin $\text{CsTreat}^{\text{®}}$ -ioninvaihtimella Grimselin kolloidien in situ -kulkeutumiskokeessa. Luonnontieteiden kandidaatintutkielma Helsingin yliopisto.

Maisterin- tai diplomi-insinöörintutkielmat

Akinwunmi, B. 2017. Swelling Behavior of Na- montmorillonite as a function of temperature: A computational study, MSc Thesis, Department of Chemistry, University of Eastern Finland, 547 (2017).

Dzugala, M. 2016. Pull experiment to validate photogrammetrically predicted friction angle of rock discontinuities. MSc thesis. Aalto University. 116+6 p. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-201609224184>.

Fayoyiwa, A. 2017. Molecular dynamics study of iron-rich clay, MSc Thesis, Department of Chemistry, University of Eastern Finland, 583 (2017).

Heikkinen N. 2016. Kaasujen liukoisuus Outokummun syväkairareian suolaisessa pohjavedessä. Pro Gradu -tutkielma, Helsingin yliopisto 77 p.

Iakovlev, D. 2015. Vertailu Barton-Bandis- ja Mohr-Coulomb-mallien käytöstä rakostabiliteetin analyysiin. Diplomityö. 62 + 4 s. Aalto-yliopisto. <https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/18656>.

Korpi, E. 2016. Quantifying loss of geometrical features in downscaling of rock joint surfaces using shear box replica series (Kalliorakopintojen alaspäinskaalauksessa tapahtuvan geometrisen informaation katoamisen määrittäminen rasialeikkauskoetta replikoidulle näytesarjalle käyttäen). Diplomityö. Aalto-yliopisto. 90+15 s. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-201605262266>.

Kuisma, P. 2018. Sanomalehtikeskustelu ydinjätteen KBS-3-loppusijoitusmenetelmän riskeistä Suomessa ja Ruotsissa. Jyväskylän yliopisto. Humanistis-yhteiskuntatieteellinen tiedekunta. Pro gradu. Sosiologia.

Kääriäinen, T. 2015. Bentoniitin elastoplastisten ominaisuuksien määrittäminen. Master's thesis, JyU.

Lindroos, V. 2015. Corrosion of copper in synthetic oxygen-free ground water. Diplomityö, Aalto-yliopisto, Kemian tekniikan korkeakoulu. 73 s.

Lämsä, J. 2015. Veden kulkeutumisen ja muodonmuutosten mittaaminen MX-80-tyyppisessä bentoniitissa röntgenmikrotomografisin menetelmin". Master's thesis, JyU.

Manninen, A. 2017. Microbiological sulphate reduction in deep groundwater environment, Pro gradu työ, Helsingin yliopisto.

Muuri, E. 2015. The sorption and diffusion of ¹³³Ba in granitic rocks. Pro gradu -tutkielma Helsingin yliopisto (13.11.2015).

Porté, R. 2017. Calibration of parameters for constitutive modelling of MX-80 bentonite. Politecnico di Torino MSc thesis & Aalto University final project. Thesis has not been funded by KYT2018 programme, though done under supervision of Abed and Sołowski.

Sirkiä, J. 2015. Requirements for initial data in photogrammetric recording of rock joint surfaces (Vaatimukset lähtötiedoille kallion rakopintojen fotogrammetrisesta tallennusta varten). Diplomityö. Aalto-yliopisto. 83+14 s. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-201512165744>.

Suorsa, V. 2017. Radionuclide transport on the block-scale –effect of clay colloids on RN mobility. Pro gradu työ, Helsingin yliopisto.

Tenitz, A. 2016. Kuparin korroosio ydinjätteen loppusijoitusolosuhteissa (Corrosion of copper in deep geological repository conditions). Diplomityö, Aalto-yliopisto, 2016, 64 s.

Väitöskirjat

Ikonen, J. 2017. Sorption and matrix diffusion in crystalline rocks – In-situ and laboratory approach. Helsingin Yliopisto, Doctoral thesis in Radiochemistry 36 (8.9.2017).

Itälä, A. 2018. Bentoniitin kemiallinen käyttäytyminen KBS-3V konseptin lähialueella. Väitöskirja, Helsingin Yliopisto, VTT Science 183 (20.11.2018), 60 s.

Kietäväinen, R. 2017. Deep Groundwater Evolution at Outokumpu, Eastern Finland: From Meteoric Water to Saline Gas-Rich Fluid. Väitöskirja, Helsingin Yliopisto, GTK:n erikoisjulkaisu nro 97, 54 s.

Kuva, J. 2016. Tracer Migration in Crystalline Rock – Application to Geological Barriers of Nuclear Waste Storage. Väitöskirja (20.1.2016), Jyväskylän Yliopisto, 72 s.

Lavikainen, L. 2016. The Structure and surfaces of 2:1 phyllosilicate clay minerals. PhD Thesis, Department of Chemistry, University of Eastern Finland, 137 (2016).

Markovaara-Koivisto, M. 2017. Visualization and modelling of rock fractures and rock quality parameters in 1–3 dimensions in crystalline bedrock, Väitöskirja, Aalto-yliopisto, 14.12.2017, s. 63.

Matuszewicz, M. 2018. The Microstructure Of Bentonite Clay, PhD thesis, Department of Physics Research Report No. 9/2018, University of Jyväskylä, Jyväskylä 2018, 61 p., ISBN 978-951-39-7604-0 (print), ISBN 978-951-39-7605-7 (electronic)

Purkamo, L. 2015. Microbial ecology and functionality in deep Fennoscandian crystalline bedrock biosphere, Doctoral Thesis, VTT Science 116, 86 p. + app. 82 p.

Rajala, P. 2017. Microbially induced corrosion of carbon steel in a geological repository environment, Academic Dissertation, VTT Science S155.

Sun, L. 2016. The Effects of Structural and Environmental Factors on the Swelling Behavior of Montmorillonite – Beidellite Smectites: a Molecular Dynamics Approach. PhD thesis, Department of Chemistry, University of Eastern Finland, 135 (2016).

Tuovinen, T. 2016. Transfer of elements related to the nuclear fuel cycle – Evaluation of linearity in boreal ecosystems. Publications of the University of Eastern Finland. Dissertation in Forestry and Natural Sciences. 2016.

Uotinen, L. 2018. Prediction of stress-driven rock mass damage in spent nuclear fuel repositories in hard crystalline rock and in deep underground mines (Kallion jännitystilavaurioiden ennustaminen käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoitus-tiloissa ja syvissä kaivoksissa). Väitöskirja. Aalto-yliopisto. 63 + 105 s. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-60-8005-5>.

KYT2018

Kansallinen ydinjätehuollon tutkimusohjelma 2015–2018

Loppuraportti

KYT2018 toteutettiin vuosina 2015–2018. Sen tavoitteena on ollut varmistaa, että viranomaisilla on saatavilla sellaista ydinteknistä asiantuntemusta, jota tarvitaan ydinjätehuollon erilaisten toteutustapojen ja menetelmien vertailuun.

KYT2018:n sisältö koostui kansallisesti tärkeistä tutkimuskohteista, jotka ovat ydinjätehuollon pitkäaikaisturvallisuus, ydinjätehuollon teknologiat ja ydinjätehuolto ja yhteiskunta. Tutkimusohjelmassa oli mukana 32 tutkimus- tai infrahanketta; hankkeista suurin osa kohdistui pitkäaikaisturvallisuuteen. Ohjelmassa pyrittiin osaltaan edistämään kansallisen osaamisen ja tutkimusinfrastruktuurin kehitystä, varmistamaan asiantuntemuksen jatkuva saatavuus, edistämään korkealaatuista tieteellistä tutkimusta ja lisäämään yleistä tietämystä ydinjätehuollon alalla.

Tässä loppuraportissa esitetään KYT2018-tutkimusohjelman tavoitteet, organisointi ja tulokset.

Verkkojulkaisu

ISSN 1797-3562

ISBN 978-952-327-408-2

Sähköinen versio: julkaisut.valtioneuvosto.fi

Julkaisumyynti: julkaisutilaukset.valtioneuvosto.fi